

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**М.Ф. Жовнір, А. В. Іващук, Т. Ю. Обухова, М.С.  
Ульянова**

# **ФУНКЦІОНАЛЬНА ЕЛЕКТРОНІКА ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського  
як навчальний посібник для студентів,  
які навчаються за спеціальністю 153 «Мікро та наносистемна техніка»,  
спеціалізації «Мікро та наноелектронні прилади і пристрої», «Мікроелектронні  
інформаційні системи», «Електронні біомедичні системи і технології»,  
«Інформаційні технології проектування в електроніці та наносистемах»*

Київ  
КПІ ім. Ігоря Сікорського  
2018

Рецензент: Тимофєєв В.І., д-р техн. наук, проф.  
Відповідальний редактор: Борисов О.В., канд. техн. наук, проф.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 9 від 23.05.2018 р.)  
за поданням Вченої ради факультету електроніки (протокол №04/2018 від 24.04.2018 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

*Жовнір Микола Федорович, канд. техн. наук, доц.  
Іващук Анатолій Васильович, канд. техн. наук, доц.  
Обухова Тетяна Юріївна, канд. техн. наук, ст. викл.  
Фадєєв Михайло Сергійович, ас.*

## ФУНКЦІОНАЛЬНА ЕЛЕКТРОНІКА ЛАБОРАТОРНИЙ ПРАКТИКУМ

Функціональна електроніка: Лабораторний практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. для студ. спеціальності 153 «Мікро та наносистемна техніка», спеціалізації «Мікро та нанoeлектронні прилади і пристрої», «Мікроелектронні інформаційні системи», «Електронні біомедичні системи і технології», «Інформаційні технології проектування в електроніці та наносистемах»/ М.Ф. Жовнір, А.В. Іващук, Т.Ю. Обухова, М.С. Фадєєв ; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,71 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018. – с. 73

Відповідно до навчальної програми дисципліни «Функціональна електроніка» передбачено виконання 6 лабораторних робіт: «Дослідження характеристик оптронів та функціональних пристроїв на їх основі (оптоелектронний перетворювач)» (2 роботи), «Дослідження логічних схем на тунельних діодах», «Дослідження лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях», «Дослідження смугового фільтра на поверхневих акустичних хвилях» та «Енергонезалежна пам'ять». Студенти практично досліджують принцип роботи пристроїв заснованих на різних фізичних явищах, зокрема оптронні пари, тунельні діоди та пристрої на поверхнево акустичних хвилях.

©М.Ф. Жовнір, А.В. Іващук, Т.Ю. Обухова, М.С.Фадєєв, 2018  
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018

## Зміст

|   |           |
|---|-----------|
| Зміст.....  | 3         |
| Вступ .....   | 4         |
| Лабораторні роботи № 1 та 2 «Дослідження характеристик оптронів та функціональних пристроїв на їх основі (оптоелектронний перетворювач)» .. | 5         |
| 1. Теоретичні відомості: .....  | 5         |
| 2. Порядок виконання лабораторних робіт .....   | 17        |
| Лабораторна робота №1 .....   | 17        |
| Лабораторна робота №2 .....   | 21        |
| Контрольні питання .....  | 23        |
| Лабораторна робота № 3 «Дослідження логічних схем на тунельних діодах».....   | 24        |
| 1. Теоретичні відомості .....   | 24        |
| 2. Порядок виконання лабораторної роботи .....  | 29        |
| Контрольні питання .....  | 31        |
| Лабораторна робота №4 «Дослідження лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях».....  | 32        |
| 1. Теоретичні відомості .....   | 32        |
| 2. Порядок виконання лабораторної роботи .....  | 40        |
| Контрольні питання .....  | 42        |
| Лабораторна робота №5 «Дослідження смугового фільтра на поверхневих акустичних хвилях».....   | 44        |
| 1. Теоретичні відомості .....   | 44        |
| 2. Порядок виконання лабораторної роботи .....  | 49        |
| Контрольні питання .....  | 50        |
| Лабораторна робота № 6 «Енергонезалежна пам'ять».....   | 52        |
| 1. Теоретичні відомості .....   | 52        |
| 2. Порядок виконання лабораторної роботи .....  | 64        |
| Контрольні запитання.....   | 68        |
| <i>Додаток 1. Титульний аркуш протоколу.....</i>  | <i>70</i> |
| <i>Додаток 2. Алгоритми EEPROM.....</i>   | <i>71</i> |
| <i>Додаток 3. Алгоритми Flash.....</i>  | <i>72</i> |

## **Вступ**

Предмет навчальної дисципліни «Функціональна електроніка» – фізичні явища (ефекти), які лежать в основі роботи сучасних функціональних приладів і пристроїв, базується на використанні різноманітних фізичних явищу твердому тілі та пропонує принципово новий підхід до реалізації заданої функції апаратури без застосування стандартних базових елементів.

Основне завдання лабораторних занять – набуття досвіду експериментальних досліджень та аналізу властивостей пристроїв функціональної електроніки, розвиток уміння застосовувати теоретичні знання для практичного використання фізичних ефектів з метою вирішення певних проблем функціональної електроніки.

Студенти практично досліджують принцип роботи пристроїв заснованих на різних фізичних явищах, зокрема оптронні пари, тунельні діоди та пристрої на поверхнево акустичних хвилях.

## Лабораторні роботи № 1 та 2

### Дослідження характеристик оптронів та функціональних пристроїв на їх основі (оптоелектронний перетворювач)

**Мета роботи:** Дослідження характеристик оптронів та функціональних пристроїв на їх основі

#### 1. Теоретичні відомості:

Оптрон називають оптоелектронний прилад, що має джерело світла (ДС) та приймач світлового випромінювання — фотоприймач (ФП), які конструктивно та оптично зв'язані між собою (рис. 1).

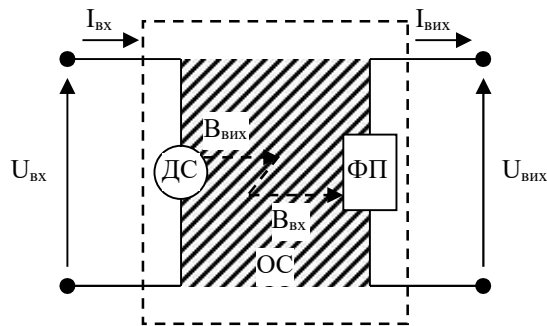


Рис. 1. Схема елементарного оптрона.

Керуючим (вхідним) сигналом для джерела світла є вхідна напруга  $U_{вх}$  або вхідний струм  $I_{вх}$ , а вихідним — яскравість світіння  $B_{вих}$ . Вхідним сигналом для фотоприймача є падаючий світловий потік  $B_{вх}$ , а вихідним — напруга  $U_{вих}$ , або струм  $I_{вих}$ , значення яких залежить від зміни інтенсивності світлового потоку  $B_{вх}$ . Джерело світла і фотоприймач зв'язані між собою активним або пасивним оптичним середовищем (ОС). Принцип роботи оптрона полягає в тому, що у джерелі світла електрична енергія перетворюється на світлову, яку вловлює фотоприймач, і на його виході виникає електричний імпульс. При цьому електрична напруга на випромінювач може подаватися як від зовнішнього джерела, так і від електричного ланцюга фотоприймача. У свою чергу, світловий потік може надходити на фотоприймач як від випромінювання оптрона, так і від зовнішнього джерела світла. Виходить, що основні елементи оптрона — випромінювач та фотоприймач — можуть бути зв'язані і оптичним, і електричним ланцюгами. Якраз можливість реалізації різноманітних зв'язків між цими елементами відкриває широкі можливості використання оптронів у функціональній мікроелектроніці. Отже, головна особливість оптрона — гальванічна розв'язка вхідного та вихідного кіл і однонаправленість сигналів, що характерно для оптичних ліній зв'язку.

Переваги оптронів зумовлені використанням для переносу інформації

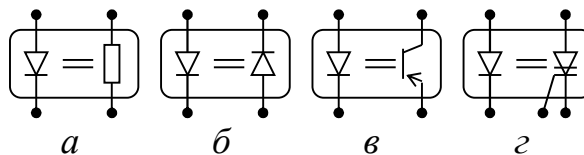
електрично нейтральних фотонів. Це ідеальна гальванічна розв'язка між входом і виходом; однонаправленість поширення інформації по оптичному каналу; широка частотна смуга пропускання оптрона; несприйнятливість оптичних каналів зв'язку до впливу електромагнітних полів; фізична та технологічна сумісність з електронними приладами.

На жаль, оптронам властиві і недоліки — високий рівень власних шумів, температурна чутливість, необхідність використання гібридної, непланарної технології при їх виготовленні.

Щодо видів зв'язку оптрони поділяються на дві групи: з прямим оптичним зв'язком, або елементарні оптрони, та з комбінованими оптичними і електронними зв'язками. Називатимемо їх активними оптронами.

Крім загальних вимог, що ставляться до елементів оптрона, таких як малі габарити і маса, стійкість до механічного та кліматичного впливу, технологічність, слід узгодити їх щодо спектральних характеристик, швидкодії і температурних властивостей. Функціонально як елемент електричної схеми оптрон характеризується насамперед параметрами фотоприймача, тому від цього елемента і названо прилад.

До елементарних оптронів належать резисторні, діодні, транзисторні та тиристорні оптрони (рис. 2). Принцип роботи використовуваних в оптронах фотоприймачів ґрунтується на внутрішньому фотоефекті: на зміні провідності при опромінюванні (резисторний оптрон) або на виникненні фотоЕРС на якому-небудь потенційному бар'єрі (діодний, транзисторний, тиристорний оптрони).



*Рис. 2. Схеми елементарних оптронів:*

*а – резисторного; б – діодного; в – транзисторного; г – тиристорного.*

Як джерела світла використовують мініатюрні лампи розжарювання та газорозрядні лампи, частіше електролюмінісцентні конденсатори та світлодіоди, технологія виготовлення яких допускає їх безкорпусне виконання, а також у вигляді інтегральних матриць з високою густиною пакування. Великі вимоги висуваються до випромінювачів оптронів. Вони повинні мати високу швидкодію і ефективність перетворення електричної енергії на енергію випромінювання, простоту збудження й модуляції випромінювання, вузьку спрямованість випромінювання, спектральне узгодження з вибраним фотоприймачем. Основним і найуніверсальнішим випромінювачем, що використовується в оптронах, є напівпровідниковий світловипромінюючий діод. В основному використовуються світлодіоди на основі арсеніду галію і твердих розчинів  $\text{Al}_x\text{Ga}_{1-x}\text{As}$  та  $\text{GaAs}_x\text{P}_{1-x}$ .

Найбільш поширені як фотоприймачі: фоторезистори, фотодіоди, фототранзистори та фототиристори, опори яких змінюються із зміною

освітленості. Для їх виготовлення можуть бути використані методи інтегральної технології. У багатьох випадках у колі приймача використовують складні структури: фотодіод з високочастотним транзистором або тиристором, схему Дарлінгтона та ін. Найуніверсальнішими для оптронів є фотоприймачі з *p-n*-переходами, які здебільшого створюються на основі кремнію і максимальна чутливість яких лежить у межах 0.7 – 0.9 мкм.

Відкриті оптичні канали або просто повітряні проміжки між джерелом світла та фотоприймачем застосовують рідко. Вимоги до оптичного середовища оптрона зумовлені функціями, які воно виконує в оптроні. По-перше, середовище забезпечує створення конструктивно цілісного приладу і тому воно повинне бути стійким при будь-яких експлуатаційних впливах — механічних, кліматичних тощо. По-друге, воно забезпечує гальванічну розв'язку електричного ланцюга випромінювача і ланцюга фотоприймача, тому має бути з високим опором. Нарешті, головне — середовище має забезпечити проходження світлового потоку від випромінювача до фотоприймача і тому повинне бути з мінімальним поглинанням у спектральній області роботи оптрона, мати коефіцієнт заломлення, близький до коефіцієнта заломлення випромінювача і фотоприймача, щоб зменшити втрати на відбивання від границь розділення оптичного середовища та активних елементів оптрона, повинне добре узгоджуватися за температурними коефіцієнтами розширення з матеріалами активних елементів. Частіше як оптичне середовище використовують тверді імерсійні середовища: полімерні органічні сполуки, халькогенідне скло, скловолоконні світловоди. Останні мають найбільш високі ізоляційні властивості. Оптрони з гнучкими скловолоконними світловодами близькі за своїм призначенням до ліній фотонного зв'язку.

Кероване джерело світла та фотоприймач створюють оптронну пару — основу елементарного оптрона.

Елементарні оптрони відрізняються своїми характеристиками та параметрами. Це дозволяє складати оптоелектронні схеми, різні за складністю, принципом роботи та призначенням.

Властивості будь-якого оптрона описуються чотирма групами параметрів: вхідними, передавальними і вихідними характеристиками та параметрами гальванічної розв'язки.

До параметрів випромінювача належать вхідний струм або вхідна напруга; для фотоприймача характерні вихідна напруга або струм, час наростання і спаду вихідного імпульсу; гальванічна розв'язка визначається опором ізоляції та прохідною ємністю; ступінь впливу випромінювача на фотоприймач, тобто передаточна характеристика, визначається або коефіцієнтом передачі  $K_{оп}$  — відношення вихідного сигналу до вхідного оптрона для діодних і транзисторних оптронів, або відношенням темнового опору  $R_T$  до світлового  $R_C$  для резисторних оптронів. Передаточні характеристики деяких типів оптронів показано на рис. 3.

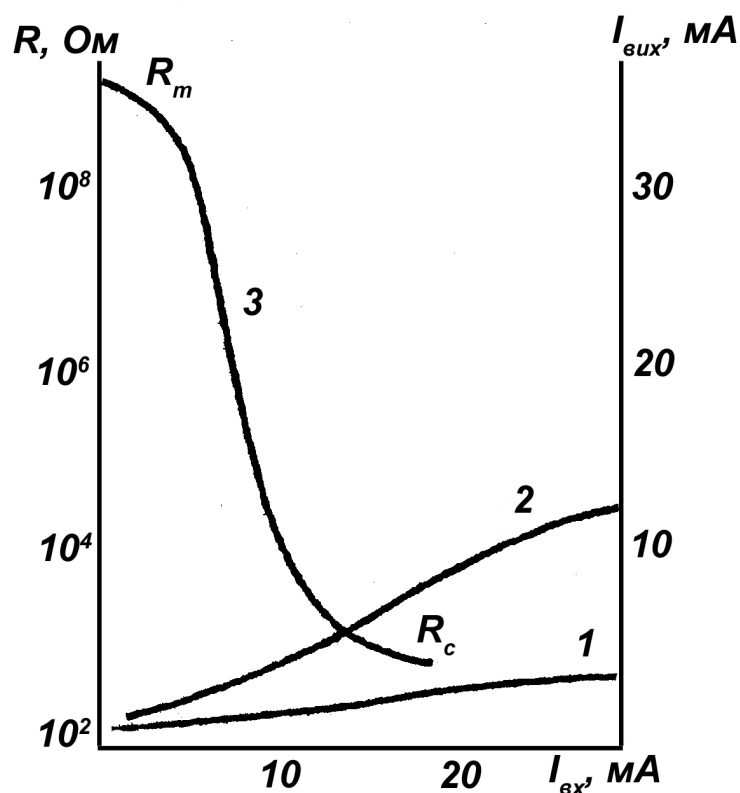


Рис. 3. Передаточні характеристики діодного (1), транзисторного (2), та резисторного (3) оптронів

До основного типу відносять оптрони з внутрішнім прямим оптичним зв'язком (рис. 4, а), в яких електричний зв'язок між елементами пари відсутній, тобто вони гальванічно розв'язані. При цьому із зміною напруги або струму джерела світла ( $U_{вх}, I_{вх}$ ) змінюється яскравість його світіння, що, у свою чергу, змінює опір фотоприймача і напругу та струм на виході. Таким чином, здійснюється перетворення вхідного електричного сигналу ( $U_{вх}, I_{вх}$ ) у вихідний електричний сигнал ( $U_{вих}, I_{вих}$ ) за схемою: електричний сигнал — оптичний сигнал — електричний сигнал. При цьому оптрон — це деякий опір, який змінюється із зміною рівня вхідного сигналу (як у транзисторі).

На принциповій схемі вхідний та вихідний електричні сигнали, а також світловий сигнал представлені функціями  $\varphi_{вх}(U_{вх}, I_{вх})$ ,  $\varphi_{вих}(U_{вих}, I_{вих})$  та  $B(U_{вх}, I_{вх})$ . Електричний сигнал зміщення по другому незалежному входу представлений функцією  $\varphi_2(U_2, I_2)$ , де  $U_2, I_2$  — напруга та струм зміщення, які задають опір фотоприймача  $Z_{фп} = \gamma(B, U_2, I_2)$ . Функція  $\gamma(U_1, I_1)$  — фактор керування оптичним середовищем за третім незалежним входом оптрона, з допомогою якого можна керувати параметрами світлового пучка: фазою та довжиною хвилі, напрямленням. Це обумовлює функцію передачі оптичного середовища  $B(\gamma)$ .



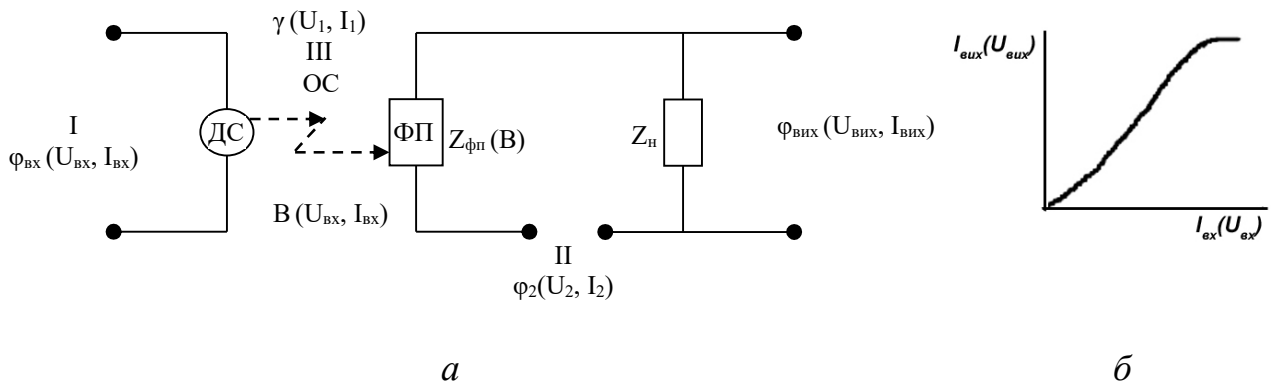


Рис. 4. а – принципова схема оптрона з прямим оптичним зв'язком;  
б – передавальна характеристика.

Коефіцієнт передачі оптрона описується рівнянням

$$K_{оп} = \psi[K_{ДС}(U_{вх}, I_{вх}), K_{ОС}(U_1, I_1), K_{ФП}(U_2, I_2), \Phi_{вх}(U_{вх}, I_{вх}), \Phi_2(U_2, I_2)]$$

де  $K_{ДС}$ ,  $K_{ОС}$ ,  $K_{ФП}$  — відповідно коефіцієнти передачі джерела світла, оптичного середовища та фотоприймача. Оптрони з прямим оптичним зв'язком можуть використовуватися як лінійні та диференціальні підсилювачі, модулятори, змішувачі, генератори релаксаційних коливань та ін.

Отже, для оптронів з прямим оптичним зв'язком характерні:

- висока шумозахищеність, оскільки відсутній гальванічний зв'язок між входом і виходом;
- можливість керування по кожному з трьох незалежних входів;
- велика гнучкість та можливість принципу фотоелектронного перетворення, що створює умови для одержання оптоелектронних схем різного призначення.

Є ще один тип оптронів з прямим оптичним зв'язком. До них належать оптрони із зовнішнім оптичним зв'язком (рис. 5), які перетворюють оптичний сигнал в електричний сигнал і останній — в оптичний сигнал.

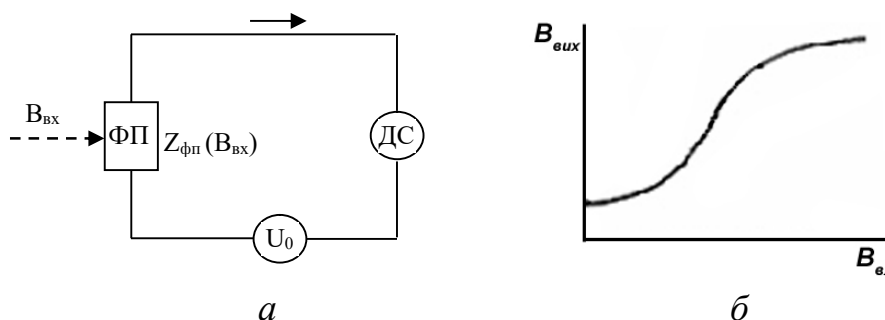


Рис. 5. а – схема оптрона з зовнішнім оптичним зв'язком;  
б – передавальна характеристика.

В такому оптроні (рис.5, а) входним сигналом є світловий потік  $B_{вх}$  від незалежного джерела випромінювання. Із зміною  $B_{вх}$  змінюється опір фотоприймача  $Z_{фп}$ , що при  $U_0 = \text{const}$  приводить до зміни струму  $I_n$ . В свою чергу вихідний світловий потік  $B_{вих}$  джерела світла залежить від струму  $I_n$ , що

протікає через нього. Таким чином, із зміною  $B_{вх}$ , змінюватиметься  $B_{вих}$ , що показує передавальна характеристика оптрона (рис. 5, б).

За допомогою оптронів із зовнішнім оптичним зв'язком, підібравши певним чином спектральні характеристики джерела світла та фотоприймача, можна здійснювати перетворення випромінювання однієї довжини хвилі у випромінювання іншої довжини хвилі, наприклад, перетворення інфрачервоного або рентгенівського випромінювання у видиме світло.

Оптрони характеризуються вхідними, вихідними та прохідними параметрами, які задаються структурою оптронної пари. Основними вхідними параметрами є найбільша вхідна напруга  $U_{вх.мах}$  і найбільший вхідний струм  $I_{вх.мах}$ .

До прохідних параметрів відносяться значення прохідної ємності  $C_{пр}$  і опір ізоляції  $R_{із}$ ; час увімкнення  $t_{увімк}$  — відрізок часу з моменту подачі імпульсу вхідного струму до моменту досягнення вихідним струмом 90 % свого усталеного значення; час вимкнення  $t_{вимк}$  — час з моменту припинення прямого струму і до моменту, при якому вихідний струм зменшиться до 50% початкового значення.

Вихідні параметри визначаються, в основному, параметрами фотоприймачів.

Функціональна схема оптрона з електрооптичним зв'язком приведена на рис. 6. Для неї можливі два режими роботи: із внутрішнім позитивним чи негативним зворотним зв'язком і без нього. В останньому випадку оптичний зв'язок лише зовнішній. Якщо оптичного зворотного зв'язку в оптроні немає, то вихідним його сигналом є випромінювання джерела світла ( $B_{вих}$ ), і режим оптрона відповідає режиму підсилювача світла. При цьому вхідним сигналом також виявляється світловий сигнал  $B_{вх}$ . Статичний коефіцієнт підсилення такого підсилювача світла визначається відношенням

$$K_B = \frac{\Delta B_{вих}(U, i) - B_{фон}}{\Delta B_{вх}},$$

де  $B_{фон}$  — фоновая яскравість на виході оптрона при  $B_{вх} = 0$ . У загальному випадку  $B_{вих}$  і  $K_B$  є складними функціями параметрів оптрона, таких як:  $y_3$ ,  $Z_a/Z_m$ . Це істотно ускладнює його розрахунок і вимагає детальних знань параметрів джерела світла і фотоприймача у всьому діапазоні  $B_{вих}$ ,  $B_{вх}$  напруг на елементах.

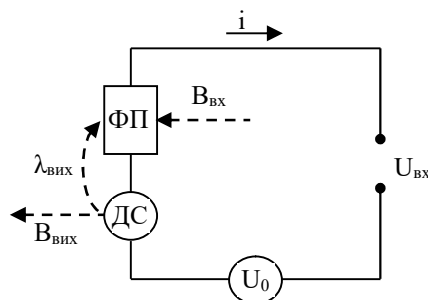


Рис. 6. Функціональна схема оптрона з електрооптичним зв'язком

Відповідно до виразу

$\Delta B_{\tilde{a}\tilde{o}} = y_{\tilde{c}} S^* \Delta U_{\tilde{a}\tilde{n}}$ , де  $\Delta U_{\text{дс}}$  — збільшення напруги на джерелі світла, викликане зміною під дією вхідної освітленості імпедансу фотоприймача. Якщо розглядати фотоприймач стосовно джерела світла, як генератор струму, то залежність  $\Delta U_{\text{н}} = \Delta U_{\text{дс}} = f(\Delta B_{\text{вх}})$  визначиться виразом

$$\Delta U_{\tilde{a}\tilde{n}} \approx S |Z_i| \Delta B_{\tilde{a}\tilde{o}} \approx a S_0 |Z_i| \Delta B_{\tilde{a}\tilde{o}}$$

і, отже,

$$K_B \approx y_3 a S^* S_0 |Z_n|$$

Якщо обмежитися для каскадів підсилювачів світла (рис. 7) режимом, близьким до лінійного, то на вході кінцевого фотоприймача оптичний вхідний сигнал визначиться добутком:

$$\Delta B_{\text{вих}} = K_B^n \Delta B_{\text{вх}} = K_B^n S^* y_3 \Delta U_{\text{вх}}, \text{ де } n — \text{число каскадів підсилювача світла.}$$

Внаслідок вузького динамічного діапазону оптронів — підсилювачів світла  $n$  звичайно невелике (1—3).

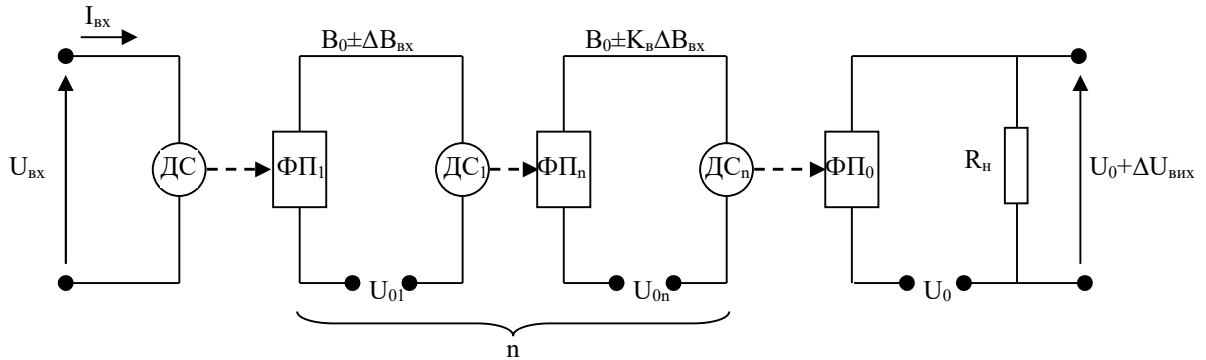


Рис. 7. Принципова схема оптоелектронного підсилювача сигналів

Визначаючи коефіцієнт передачі підсилювача в цілому як:

$$K = \frac{\Delta U_{\text{вих}}}{\Delta U_{\text{вх}}}$$

і з огляду на вираз для останнього каскаду:

$$\Delta U_{\text{вих}} = g \frac{a_n}{1 + a_n} \Delta B_{\text{вих}}$$

отримаємо:

$$K = g S^* y_3 \frac{a_n}{1 + a_n} K_B^n$$

Для  $n=1$ ,  $a_n=1$ ,  $y_3>10$ , коефіцієнт  $K$  одного порядку з  $K_B$ . Це відповідає в оптимальному режимі коефіцієнту підсилення по напрузі на оптоелектронний каскад  $10^3$ — $10^4$ .

Характеристики оптрона істотно змінюються, якщо ввести між його елементами зворотний оптичний зв'язок  $\beta_\lambda$ . Найбільш цікавим режимом такого оптрона, що реалізується при досить глибокому оптичному зворотному позитивному зв'язку, є одержання перемикаючої характеристики типу тригерної.

При позитивному зворотному зв'язку коефіцієнт підсилення оптрона  $K_B$  визначається відповідно до загальної теорії підсилювальних ланцюгів:

$$K_B = \frac{K_B}{1 - \beta_\lambda K_B}, \text{ де } K_B \text{ — коефіцієнт підсилення при розімкненому}$$

зворотному зв'язку, величина якого розраховується відповідно до:

$$K_B \approx y_3 a S^* S_0 |Z_H|$$

$\beta_\lambda$  - коефіцієнт передачі ланцюга зворотного зв'язку.

Умові одержання тригерної характеристики і регенеративного режиму відповідає

$$K_B \rightarrow \infty \text{ чи}$$

$$|1 - \beta_\lambda K_B| = 0$$

Виконання рівності залежить від значення коефіцієнтів  $\beta_\lambda$ ,  $K_B$ . Величина коефіцієнта зворотного зв'язку  $\beta_\lambda$  регулюється введенням прозорих, напівпрозорих селективних екранів між джерелом світла і фотоприймачем, а також їх взаємним розташуванням в оптроні. Величина коефіцієнта  $K_B$  залежить при всіх інших рівних умовах від режиму оптрона. В оптимальному режимі підсилювача світла  $K_B$  порядку ( $10^3$ — $10^4$ ). Тому умова виконується в оптроні порівняно легко і не є для нього обмежувальною. Оскільки  $K_B$  велике в області малих  $V_{BX}$ , то тригерний ефект в оптроні можна здійснити при порівняно малих вхідних оптичних сигналах. При цьому вхідний світловий сигнал відіграє роль пускової кнопки, і його величина повинна бути обмежена лише знизу. Перехід системи в новий стійкий стан обумовлюється далі її внутрішніми зв'язками.

Для оптрона з електронно-оптичним зв'язком керування може здійснюватися як по оптичному, так і по електричному вході. Тригерний ефект у схемі буде спостерігатися як при збільшенні  $V_{BX}$  при  $U_0 = U_{BX} = \text{const}$ , так і у випадку зміни  $U_{BX}$  при  $V_{BX} = 0$  чи  $\text{const}$ . Для того, щоб в останньому випадку можна було скористатися виразом, що визначає величину  $K_B$ , необхідно замість  $V_{BX}$  підставити величину  $V_{BX \text{ екв}} = f(\Delta U_{BX})$ , визначаючи її з умов:

$$\Delta U_{U_0=\text{const}} = \Delta U'_{U_0=\text{var}}$$

$$V_{\text{ex}} = \text{var}, V_{\text{ex}} = 0$$

$$\frac{Z_{uc}}{Z_{uc} + Z_{\phi n}(\Delta V_{\text{ex}})} U_{\text{ex}} = \frac{Z_{uc}}{Z_{uc} + Z_T} U'_{\text{ex}}, \text{ де } Z_T \text{ — темновий імпеданс}$$

фотоприймача.

Вираз справедливий, якщо потужності обох елементів оптрону порівнянні. Критерієм реалізації тригерного ефекту є при цьому нерівність  $K_p > 1$ , де  $K_p$  — коефіцієнт підсилення по потужності оптрону з розімкнутим зворотним зв'язком.

Виконання останньої умови разом з умовою  $|1 - \beta_\lambda K_B|$  може зажадати проміжного підсилення в оптроні. Електронний підсилювач у схемі може нести і визначене функціональне навантаження в оптроні. Це приводить до залежності вихідної характеристики оптрону від виду функції  $K_y = f(V_{BX})$ . Якщо регенеративний режим оптрону обмежений лише виконанням умови

$|1 - \beta_\lambda K_\phi| = 0$ , то підсилювальна ланка може бути введена безпосередньо в ланцюг зворотного зв'язку. Такий підсилювач повинний бути підсилювачем оптичних сигналів.

З погляду забезпечення регенеративного режиму оптрону обоє рішення адекватні. Однак рішення з підсилювачем електричних сигналів відрізняється більшою схмотехнічною гнучкістю і відносною конструктивною простотою. Разом з тим введення підсилювача світла в ланцюг зворотного зв'язку дозволяє практично цілком розв'язати джерела живлення оптрона і підсилювача і зберегти загальний принцип оптоелектроніки для всіх ланок схеми.

За видом зв'язку вхідних і вихідних сигналів активні оптрони поділяються на три типи: оптрони з прямим електричним і зворотним негативним оптичним зв'язками (рис. 8, а); оптрони з зовнішнім прямим оптичним та прямим електричним зв'язками (рис. 8, б); оптрони з прямим електричним і позитивним зворотним електричним зв'язками (рис. 8, в, г).

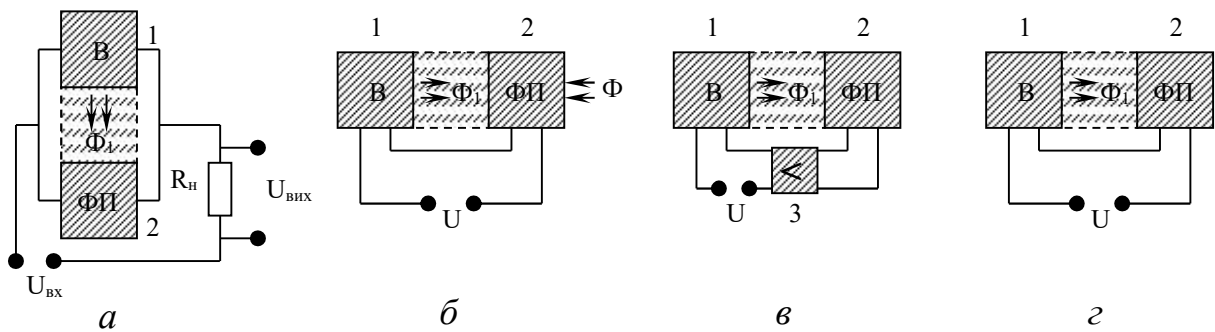


Рис. 8. Схематичне зображення активних оптронів

а – з прямим електричним і зворотним негативним оптичним зв'язками

б – з зовнішнім прямим оптичним та прямим електричним зв'язками

в, г – з прямим електричним і позитивним зворотним електричним зв'язками

Оптрони з прямим електричним і зворотним негативним оптичним зв'язками (а). У цих оптронах випромінювач 1 та фотоприймач 2 з'єднані електрично паралельно, внаслідок чого реалізується негативний оптичний зв'язок. Із збільшенням вхідної напруги і, отже, струму інтенсивність світлового потоку випромінювача зростає. Збільшення світлового потоку, що падає на фотоприймач, спричиняється до зменшення його опору і, як наслідок, до збільшення шунтуючої дії фотоприймача. В результаті сила струму через випромінювач зменшується.

Оптрони із зовнішнім прямим оптичним та прямим електричним зв'язками (б). В оптронах цього типу зв'язок між випромінювачем та фотоприймачем електричний, а вхідним і вихідним сигналами є світловий потік. Змінюючи величину світлового потоку від зовнішнього випромінювача  $\Phi$ , що падає на фотоприймач, змінюємо його опір, струм у ланцюгу і, отже, інтенсивність світлового потоку на виході випромінювача оптрона  $\Phi_1$ .

Оптрони з прямим електричним і позитивним зворотним оптичним

зв'язками (в, г). У регенеративних оптронах випромінювач  $I$  та фотоприймач  $2$  увімкнуті послідовно до одного джерела напруги  $U$ . Регенерація, тобто компенсація втрат енергії сигналу за допомогою негативного зворотного зв'язку, може здійснитися увімкненням до ланцюга підсилювача (рис. 8, в) або суміщенням підсилювача з фотоприймачем, коли використовується фотоприймач з внутрішнім підсилювачем (фоторезистор, фототранзистор; рис. 8, г). У вихідному стані інтенсивність опромінювання приймача мала. Опір його великий і через випромінювач тече слабкий темновий струм. Подаючи додаткове зміщення на оптрон за допомогою опромінювання  $\Phi$  фотоприймача зовнішнім джерелом або методом імпульсного збільшення струму через випромінювач чи підвищення напруги, можна збільшити струм у ланцюгу оптрона, що приведе до збільшення інтенсивності і, як наслідок, до зменшення опору приймача. Зменшення опору приймача і, отже, опору ланцюга зумовить зростання струму, що спричинятиме збільшення світлового потоку і подальше зростання струму. Виникає лавиноподібне збільшення струму до величини, обмеженої лише опором відкритого оптрона. Таким чином, оптрон має позитивний зворотний оптичний зв'язок, що формує у системі негативний диференціальний опір. Такий стан зберігається доти, доки зовнішнє зміщення не зменшить струм до темнового.

Включення фотоприймача і керованого джерела світла в загальний електричний ланцюг накладає на характеристики обох елементів обмеження, обумовлені вимогою їхнього узгодження по імпедансах, струму і напруги. Найбільш просто таке узгодження здійснюється для оптронної пари: електролюмінофор — фоторезистор. При цьому в якості змінного параметра виступає робоча площа одного з них. Цим пояснює той факт, що оптрони з електрооптичним зв'язком розробляються головним чином на електролюмінесцентних конденсаторах, як керованих джерелах світла і фоторезисторах, як фотоприймачах до них. В обох випадках можлива плівкова технологія, що дозволяє виготовляти оптрон у виді багатошарової тонкоплівкової структури.

Це не виключає використання в оптронах світлодіодів. Але в останньому випадку виявляються складнішими умови узгодження, що обмежує вибір фотоприймачів для оптронної пари. В оптроні з електрооптичним зв'язком на світлодіоді в силу особливостей його характеристики яскравості складніше одержати і бістабільну характеристику, що обмежує застосування таких оптронів в основному перетворювачами і підсилювачами випромінювання.

Основним критерієм узгодження в цьому випадку є узгодження по потужності. Оптрон з електрооптичним зв'язком зі світлодіодами, як джерелом світла, є сьогодні складеним оптроном, що збирається з дискретних елементів.

Оптрони з електрооптичним зв'язком знаходять застосування у функціональних електричних ланцюгах в якості перемикаючих елементів, тригерів, елементів реле часу, оптоелектронних підсилювачів електричних сигналів, підсилювачів і перетворювачів випромінювання, що запускають

реєстри, ліній затримки кільцевих лічильників, як елементи дискретної техніки: напів-суматори, схеми "І", "АБО", "НІ", диференціатори, інтегратори, елементи пам'яті тощо

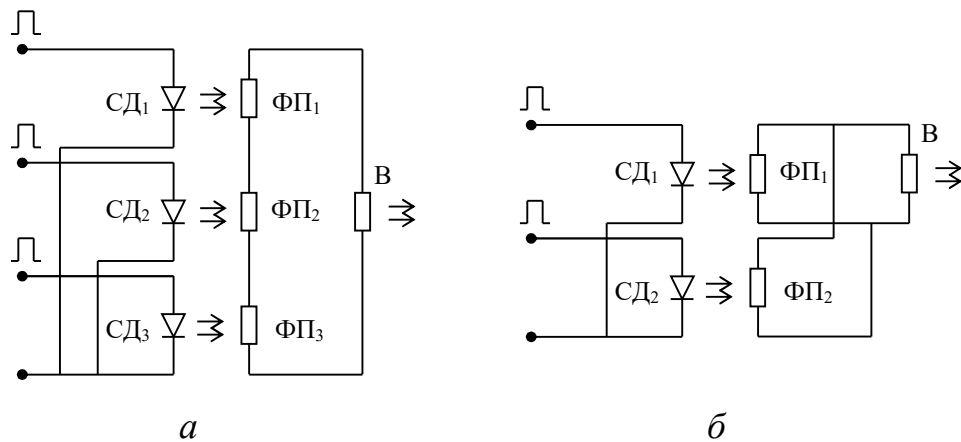


Рис. 9. Реалізація логічних функцій «І» (а) та «АБО»(б) на оптронах

В обох випадках при освітленні фотоприймачів на них падає опір (якщо мова йде про фоторезистор) або зростає фотострум (якщо мова йде про фотодіод) при цьому зростає загальний струм у системі що призводить до появи сигналу на випромінювачі (В). Для схеми «І» необхідною умовою отримання сигналу на виході є освітлення всіх трьох фотоприймачів, для «АБО» - хоча б одного.

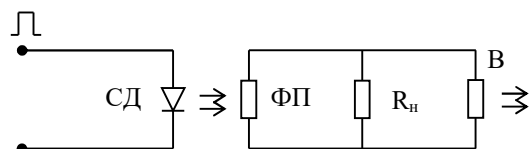


Рис. 10. Реалізація логічної функції «НІ» (інверсія) на оптронах

При освітленні фотоприймача його опір зменшується і він відіграє шунтуючу роль по відношенню до випромінювача (В). Таким чином сигнал на виході отримується тільки за відсутності сигналу на вході

Діодні та транзисторні оптрони ефективно використовуються для комутації електричних ланцюгів, у яких плавно змінюються сигнали (аналогові сигнали). Аналогові оптронні ключі виконують пропорційні перетворення миттєвих значень аналогових сигналів на амплітудні значення короткочасних імпульсів.

При побудові аналогових ключів для ефективного перетворення сигналів позитивної та негативної полярності звичайно використовують діодні оптрони (рис.11).

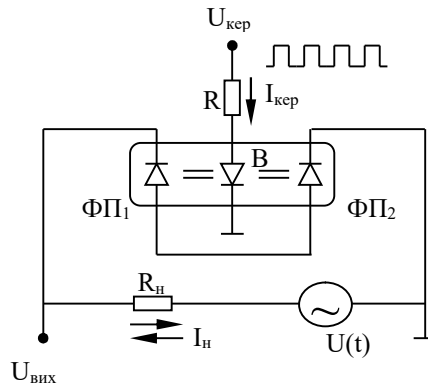


Рис. 11. Схема аналогового ключа (реле) на діодному оптроні.

У ланцюгу із джерелом модульованих сигналів  $U(t)$  назустріч один одному увімкнено діодні фотоприймачі  $\Phi\Pi_1$  та  $\Phi\Pi_2$ . Керування фотодіодами здійснюється світловими потоками від одного світлодіодного випромінювача  $B$ . Внаслідок наявності зустрічного увімкнення фотодіодів залишкова напруга  $U_{зал}$  у ланцюгу джерела модульованих сигналів невелика (приблизно 10 — 30 мВ) і може мати як позитивну, так і негативну полярність. Опір оптронного ключа, зображеного на рис.7, у відкритому стані при струмі світлодіода 10 мА, складає 10 Ом, у неосвітленому стані цей опір досягає  $10^3$  -  $10^4$  Ом.

Пристрої на оптронах, придатних для передачі аналогових сигналів, широко використовуються як комутатори в лініях телефонного зв'язку, в медичній електроніці, ланцюгах зв'язку датчиків різних фізичних параметрів з обчислювальними машинами.

Оптимальними комбінаціями випромінювача та фотоприймача в оптроні вважаються такі:

1. Випромінювач — світлодіод на основі GaAs(Zn),  $Al_x Ga_{1-x} As$ . Фотоприймач —  $p-i-n$ -фотодіод на основі Si.
2. Випромінювач — світлодіод на основі GaP(N),  $GaAs_x P_{1-x}$ . Фотоприймач — фотодіод Шоттки на основі Si.
3. Випромінювач — гетеросвітлодіод на основі  $Al_x Ga_{1-x} As$ . Фотоприймач — гетерофотодіод на основі  $Al_x Ga_{1-x} As$ .
4. Випромінювач — світлодіод на основі GaAs(Si). Фотоприймач — фототранзистор та фототиристор на основі Si.
5. Випромінювач — світлодіод на основі GaP та  $GaAs_x P_{1-x}$ . Фотоприймач — фоторезистори на основі CdS та CdSe.

Ці пари випромінювач — приймач і є базовими елементами більшості оптронів, що випускаються серійно.



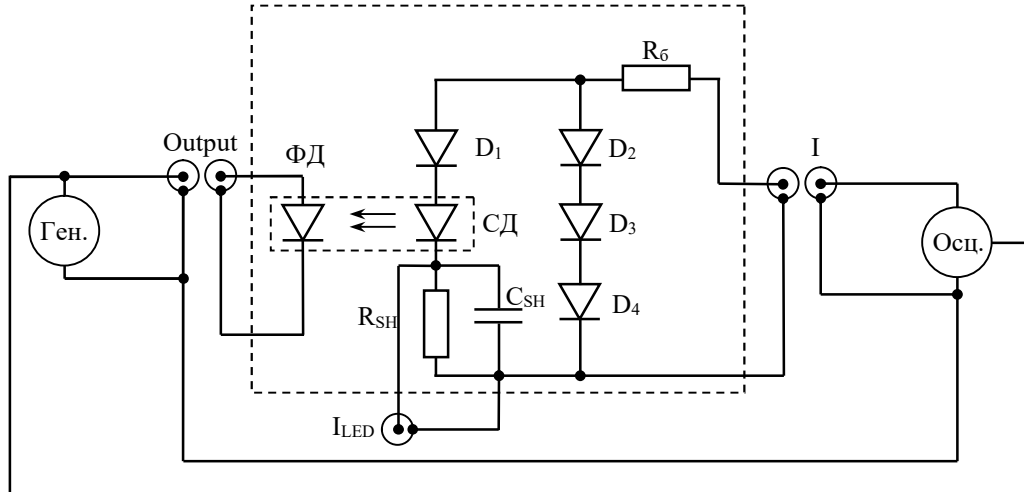
## 2. Порядок виконання лабораторних робіт

### Лабораторна робота №1

#### Дослідження динамічних та статичних характеристик оптронів

##### 2.1.1. Схеми вимірювання:

##### Макет для дослідження динамічних характеристик оптронів:



Умовні позначення:

СД – червоний світлодіод;

ФД – кремнієвий фотодіод;

R<sub>SH</sub>, C<sub>SH</sub> – шунт та згладжувальний конденсатор для визначення струму світлодіода;

D<sub>1</sub> – діод для захисту від неправильної полярності;

D<sub>2</sub>, D<sub>3</sub>, D<sub>4</sub> – діоди для захисту від підвищеної напруги;

R<sub>6</sub> – баластний резистор для згладжування ВАХ світлодіода;

Ген. – генератор прямокутних періодичних імпульсів;

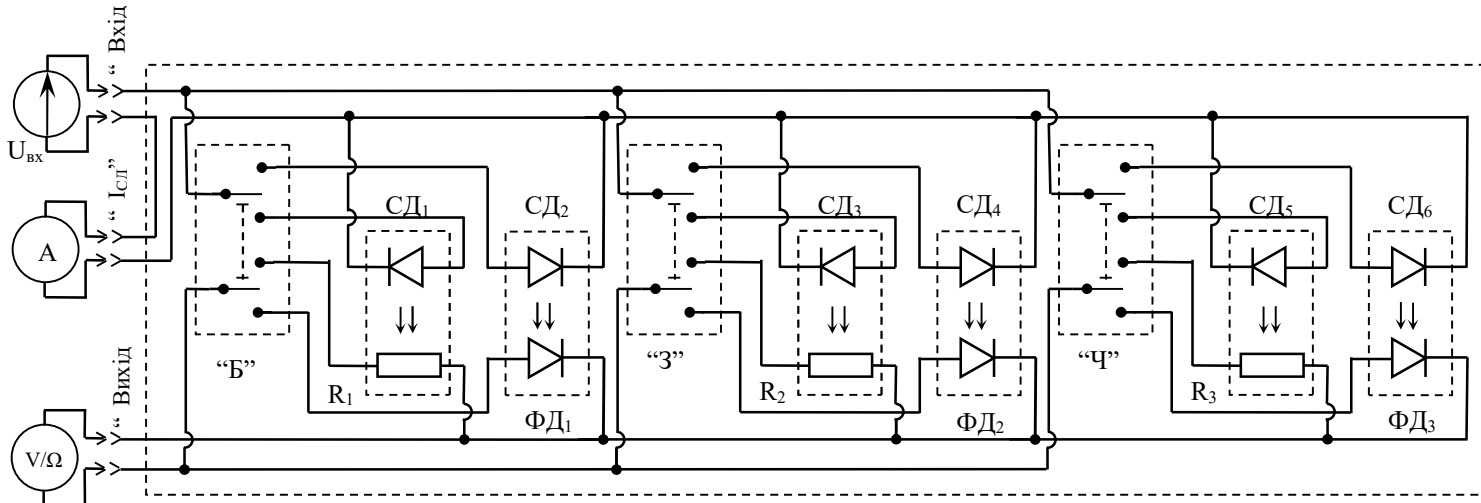
Осц. – двоканальний осцилограф;

Input – вхідний роз'єм;

Output – вихідний роз'єм;

I<sub>LED</sub> – роз'єм для визначення струму світлодіода.

## Макет для дослідження динамічних характеристик оптронів:



Умовні позначення:

СД<sub>1</sub>, СД<sub>2</sub> – білі світлодіоди;

СД<sub>3</sub>, СД<sub>4</sub> – зелені світлодіоди;

СД<sub>5</sub>, СД<sub>6</sub> – червоні світлодіоди;

ФД<sub>1</sub>, ФД<sub>2</sub>, ФД<sub>3</sub> – фотодіоди;

R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub>, R<sub>3</sub> – фоторезистори;

“Вхід” – входні клеми макету для підключення джерела живлення;

“I<sub>сд</sub>” – клеми для підключення амперметра для визначення струму світлодіодів;

“Вихід” – вихідні клеми макету для підключення мультиметра;

“Б”, “З”, “Ч” – перемикачі для білих, зелених та червоних світлодіодів, відповідно ;

U<sub>вх</sub> – блок живлення;

A – амперметр;

V/Ω – мультиметр.

### 2.1.2 Порядок виконання роботи

1. Провести вимірювання динамічних характеристик оптрона.

1.1. Зібрати схему для дослідження динамічних характеристик діодного оптрона, який складається з кремнієвого фотодіода та червоного світлодіода.

1.2. На вхід світлодіода подати періодичний імпульсний сигнал від генератора (параметри задаються викладачем).

1.3. На двохпроменевому осцилографі зняти форму сигналу з

фотодіода. Визначити значення часу включення та часу виключення оптрона по передньому та задньому фронтах імпульсу на рівні 0.1 та 0.9 амплітудного значення, тривалість вихідного імпульсу та час затримки по рівню 0.5 амплітудного значення.

1.4. Визначити залежність динамічних параметрів від амплітуди вхідного імпульсу (діапазон задається викладачем).

1.5. Визначити залежність динамічних параметрів від тривалості вхідного імпульсу (діапазон задається викладачем).

1.6. Вимкнути генератор та осцилограф.

2. Провести вимірювання статичних характеристик оптрона.

2.1. Зібрати схему для вимірювання статичних характеристик оптронів

2.2. Переключити мультиметр у режим вимірювання опору.

2.3. Ввімкнути пару білий світлодіод – фоторезистор та зняти передавальну характеристику резистивного оптрона при зміні напруги на світлодіоді (діапазон задається викладачем).

2.4. Ввімкнути пару червоний світлодіод – фоторезистор та зняти передавальну характеристику резистивного оптрона при зміні напруги на світлодіоді (діапазон задається викладачем).

2.5. Ввімкнути пару зелений світлодіод – фоторезистор та зняти передавальну характеристику резистивного оптрона при зміні напруги на світлодіоді (діапазон задається викладачем).

2.6. Переключити мультиметр в режим вимірювання струму.

2.7. Ввімкнути пару білий світлодіод – фотодіод та зняти передавальну характеристику діодного оптрона при зміні напруги на світлодіоді (діапазон задається викладачем).

2.8. Ввімкнути пару червоний світлодіод – фотодіод та зняти передавальну характеристику діодного оптрона при зміні напруги на світлодіоді (діапазон задається викладачем).

2.9. Ввімкнути пару зелений світлодіод – фотодіод та зняти передавальну характеристику діодного оптрона при зміні напруги на світлодіоді (діапазон задається викладачем).

2.10. Вимкнути мультиметр та джерело струму.

---

Стандартні діапазони вимірювань:

Частота вхідних імпульсів – 1000 Гц;

Тривалість вхідних імпульсів – від 400 мкс до 1000 мкс;

Амплітуда вхідних імпульсів – від 1,4 В до 2,4 В;

Струм світлодіода при вимірюванні статичних характеристик – від 0 мА до 5 мА;

### 2.1.3. Обробка результатів

1. За отриманими даними побудувати передавальні характеристики оптронів (залежність фотоопору або фотоструму від струму через світлодіод), залежності динамічних параметрів діодного оптрона від амплітуди та тривалості імпульсу.

2. За передавальними характеристиками розрахувати коефіцієнт передачі оптронів як

$$K = \frac{I_{\Phi D2} - I_{\Phi D1}}{I_{CD2} - I_{CD1}} \text{ або } K = \frac{R_{\Phi P2} - R_{\Phi P1}}{I_{CD2} - I_{CD1}}$$

3. Написати висновки по роботі.

---

Вимоги до звіту:

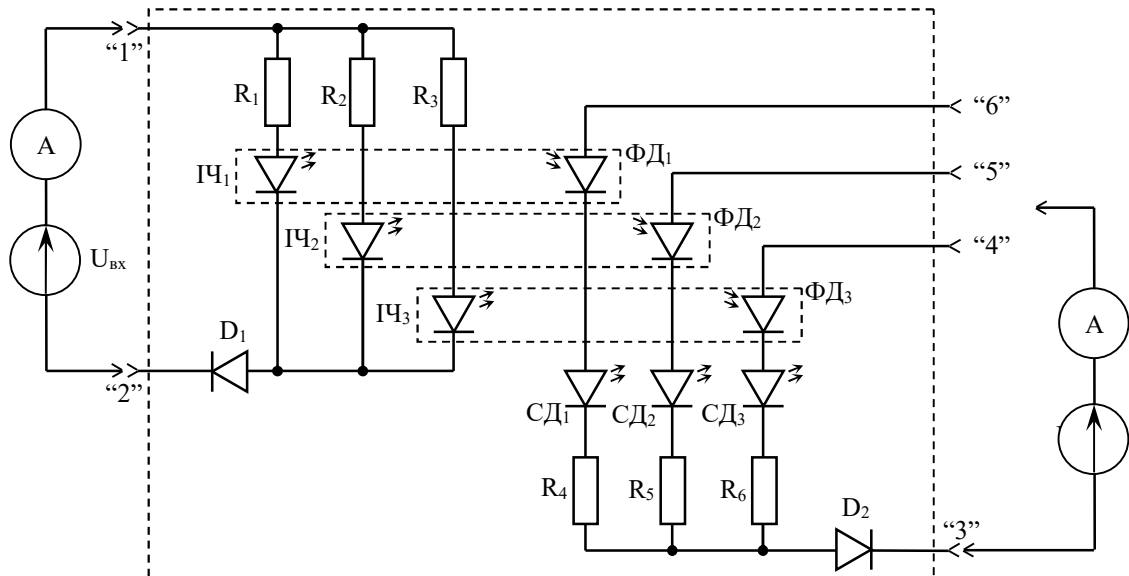
Звіт оформлюється на листах А4 у друкованій або рукописній формі і повинен містити:

- титульний аркуш;
- мету роботи;
- порядок виконання роботи;
- експериментальні результати у табличному та графічному вигляді;
- обробку результатів;
- висновки (включаючи аналіз експериментальних даних та даних отриманих в результаті їх обробки).

## Лабораторна робота №2

### Дослідження оптоелектронного перетворювача зображення

#### 2.2.1. Схема вимірювання



Умовні позначення:

1, 2 – входні гнізда схеми;

3, 4, 5, 6 – вихідні гнізда схеми;

$U_{вх}$  – джерело напруги входної частини схеми;

$U_{зм}$  – джерело напруги зміщення вихідної частини схеми;

$ІЧ_1, ІЧ_2, ІЧ_3$  – світлодіоди інфрачервоного випромінювання;

$ФД_1, ФД_2, ФД_3$  – фотодіоди (фотоприймачі);

$СД_1, СД_2, СД_3$  – жовтий, зелений і червоний світлодіоди, відповідно;

$R_1 - R_6$  – обмежувальні резистори;

$D_1, D_2$  – захисні діоди.

#### 2.2.2. Порядок виконання роботи

1. Зібрати схему стенда для вимірювання параметрів оптронного перетворювача зображення.
2. Ввімкнути джерело напруги входного ланцюга досліджуваної схеми та джерело напруги зміщення вихідного ланцюга.
3. Виставити на джерелі напруги вихідного ланцюга схеми  $U_{зм1}$  (значення задається викладачем).
4. Підключити позитивну клему вихідного вимірювального ланцюга до гнізда 4.
5. Змінюючи входний струм (діапазон та крок задається викладачем)

виміряти струм у вихідному ланцюгу для червоного світлодіода. Відмітити струм загоряння світлодіода.

6. Підключити позитивну клему вихідного вимірювального ланцюга до гнізда 5. Повторити п.5 для зеленого світлодіода.

7. Підключити позитивну клему вихідного вимірювального ланцюга до гнізда 6. Повторити п.5 для жовтого світлодіода.

8. Виставити на джерелі напруги вихідного ланцюга схеми  $U_{зм2}$  (значення задається викладачем). Повторити п. 5-7.

9. Виставити на джерелі напруги вихідного ланцюга схеми  $U_{зм3}$  (значення задається викладачем). Повторити п. 5-7.

10. Вимкнути джерела напруги.

---

Стандартні діапазони вимірювань:

Вхідний струм – від 0 мА до 60 мА;

Напруга зміщення вихідного ланцюга схеми – від 2 В до 12 В;

### **2.2.3. Обробка результатів**

1. За отриманими даними побудувати суміщені графіки залежності струму у вихідному ланцюгу від струму через інфрачервоні світлодіоди для трьох світлодіодів видимого спектру при різних значеннях напруги зміщення.

2. Вибрати робочі ділянки на отриманих характеристиках та розрахувати коефіцієнт передачі для кожного випадку.

3. Написати висновки по роботі.

---

Вимоги до звіту:

Звіт оформлюється на листах А4 у друкованій або рукописній формі і повинен містити:

- титульний аркуш;
- мету роботи;
- порядок виконання роботи;
- експериментальні результати у табличному та графічному вигляді;
- обробку результатів;
- висновки (включаючи аналіз експериментальних даних та даних отриманих в результаті їх обробки).

## Контрольні питання

1. Принцип роботи оптрону
2. Типи оптронів за видом фотоприймача
3. Оптрони з прямим електричним і зворотним негативним оптичним зв'язками
4. Оптрони з зовнішнім прямим оптичним та прямим електричним зв'язками
5. Оптрони з прямим електричним і позитивним зворотним оптичним зв'язками
6. Тригерний режим у оптротні
7. Які переваги та недоліки оптронів при використанні їх у функціональній мікроелектроніці?
8. Оптоелектронний підсилювач сигналів
9. Принцип роботи логічних функцій на оптронах
10. Поясніть роботу оптронного реле.
11. Які функціональні пристрої дискретної техніки можна реалізувати на оптронах?
12. Наведіть приклади використання оптронів при створенні функціональних аналогових пристроїв.
13. Принцип роботи оптоелектронного перетворювача оптичного відображення.
14. Як треба підбирати оптоелектронну пару для перетворення оптичного відображення?
15. Оптимальні оптронні пари

## Список літератури

1. Кравченко О. П. Фізичні основи функціональної мікроелектроніки. – К.: Либідь, 1993.- 216с.
2. Руденко В.С., Ромашко В. Я., Трифонюк В.В. Промислова електроніка. – К.: Либідь, 1993.- 432 с.
3. Свечников С. В. Элементы оптоэлектроники. – М.: Советское радио, 1971.- 272с.
4. Єрмаков О.Н. Прикладная оптоэлектроника.- М.: Техносфера, 2004.- 414 с.
5. Фрайден Дж. Современные датчики. Справочник.- М.: Техносфера, 2005.- 588 с.

## Лабораторна робота № 3

### Дослідження логічних схем на тунельних діодах

**Мета роботи:** Дослідження принципів роботи логічних схем на тунельних діодах

#### 1. Теоретичні відомості

Тунельні діоди - це діоди з сильнолегованими виродженими  $n$ - та  $p$ -областями. При утворенні  $p$ - $n$ -переходу у виродженому напівпровіднику викривлення зон настільки сильне, що дно зони провідності матеріалу  $n$ -типу виявляється нижчим від найвищого рівня валентної зони матеріалу  $p$ -типу. Енергетичну схему  $p$ - $n$ -переходу тунельною діода при відсутності зовнішньої напруги (у рівновазі) наведено на рис.1,а. Усі енергетичні стани, що знаходяться нижче від рівня Фермі, заповнені електронами, а ті, що розташовані вище, - вільні. Вільні носії заряду мають велику концентрацію, тому ширина  $p$ - $n$ -переходу  $d$  дуже мала, приблизно  $(1 \div 2) \times 10^{-8}$  м. За таких умов імовірність тунельних переходів значна. Якщо зовнішнього поля немає, частота переходу електронів справа наліво і в зворотному напрямку однакова і загальний струм дорівнює нулю. Цей стан відповідає точці «0» на вольт-амперній характеристиці.

В міру зростання подачі прямого зміщення перекриття зон зменшуватиметься. Заповнені стани зони провідності  $n$ -області, що знаходяться вище від рівня Фермі, виявляються навпроти незаповнених станів валентної зони  $p$ -області. Кількість тунельних переходів справа наліво перевищить кількість зворотних переходів, і прямий струм почне зростати (рис.1,б). Коли дно зони провідності  $n$ -області виявиться на одній горизонталі з рівнем Фермі  $p$ -області, прямий тунельний струм досягне максимуму (рис.1,в). З подальшим збільшенням прямого зміщення зменшиться сила струму, тому що починає зменшуватись число зайнятих станів у зоні провідності  $n$ -області, які лежать навпроти вільних станів у валентній зоні  $p$ -області (рис.1,г). Утворюється спадаюча ділянка ВАХ - ділянка негативної диференціальної провідності.

Нарешті, при такому зміщенні, коли зникне перекриття зон, тобто коли положення дна зони провідності  $n$ -області збігається з положенням найвищою рівня валентної зони в  $p$ -області, тунельні переходи припиняться, і сила струму досягне максимуму (рис.1,д).



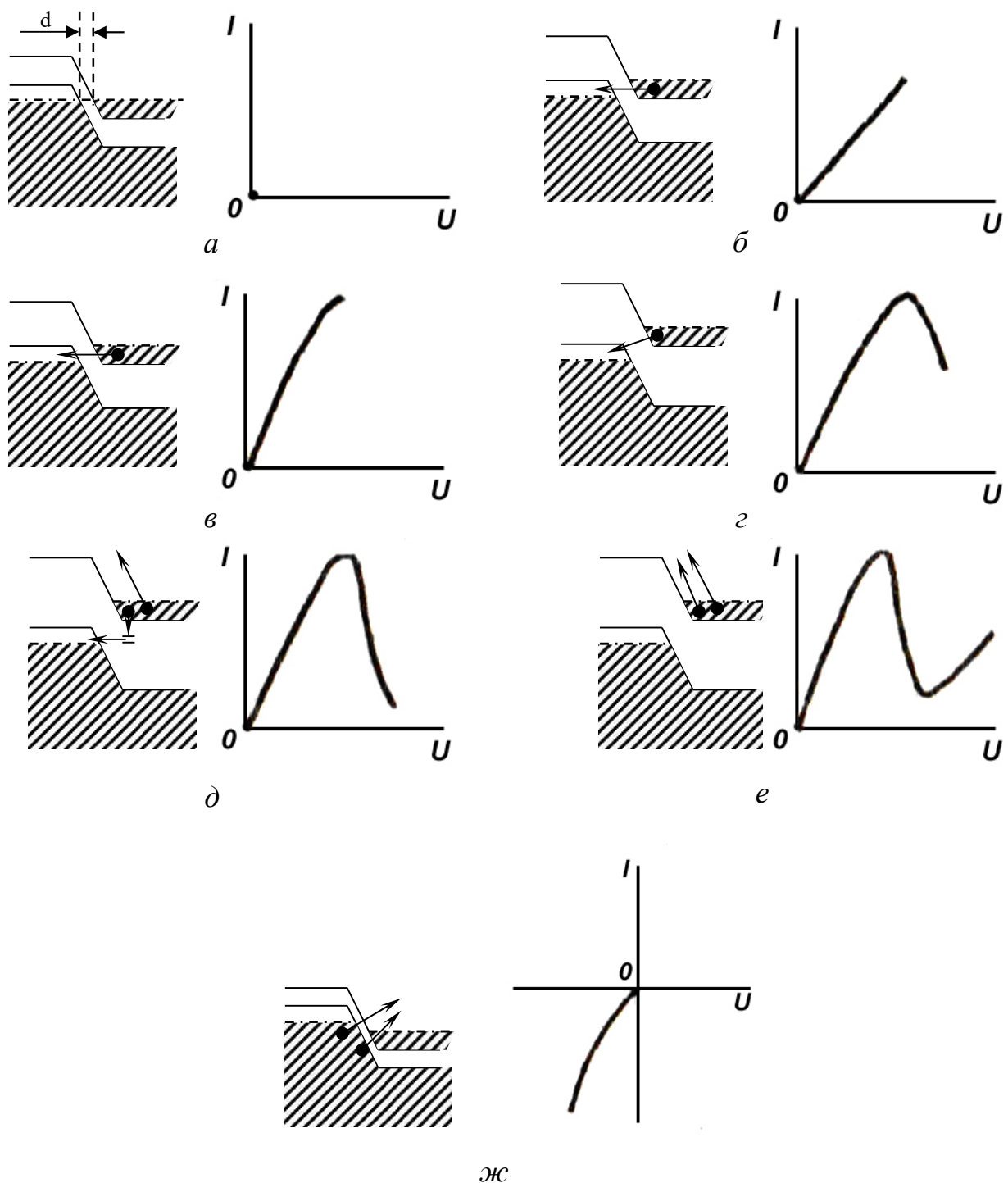


Рис.1. Якісне пояснення вольт-амперної характеристики тунельного діода

Струм у мінімумі не дорівнює нулю, він зумовлений двома причинами. По-перше, збільшується дифузійна складова струму електронів з  $n$ -області і дірок з  $p$ -області як у звичайних діодах. По-друге, можливий процес тунелювання через глибокі центри, розміщені в забороненій області напівпровідника  $n$ -типу. Електрони захоплюються на домішкові центри, а з них тунелюють у валентну зону діркового напівпровідника. Наступне

збільшення прямого зміщення зумовлює інжекцію і появу звичайного діодного струму (рис.1,е).

При подачі негативного зміщення (клема «мінус» джерела приєднана до  $p$ -області, а «плюс» до  $n$ -області) перекриття зон збільшується (рис.1,ж) , і при цьому заповнені стани валентної  $p$ -області будуть лежати навпроти вільних станів зони провідності  $n$ -області. Внаслідок цього кількість тунельних переходів зліва направо перевищить кількість переходів справа наліво, і сила струму збільшиться. Чим більшою буде величина зворотної напруги, тим значніше перекриття зон і тим більша зворотна сила струму.

Найцікавішою властивістю тунельного діода є те, що в деякому діапазоні прямих напруг він має негативну диференціальну провідність. Якраз цю особливість тунельного діода можна використати для генерації і підсилення електромагнітних коливань, а також у схемах, що перемикаються.

Оскільки дія тунельних діодів ґрунтується на тунелюванні електронів через потенційний бар'єр, а час цього процесу дуже малий (приблизно  $10^{-13} \div 10^{-14}$  с) і в базі завдяки невеликим напругам неосновні носії заряду не накопичуються, то тунельні діоди здатні працювати на частотах до сотень гігагерц. Еквівалентну схему тунельного діода представлено на рис. 2.

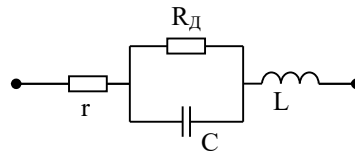


Рис.2. Еквівалентна схема тунельного діода

Повний опір тунельного діода при малій синусоїдальній напрузі становить:

$$Z = r + \frac{R_A}{1 + \omega^2 C^2 R_A^2} + j\omega \left( L - \frac{R_A}{1 + \omega^2 C^2 R_A^2} \right)$$

де  $L$  – індуктивність діода;

$\omega$  – циклічна частота;

$R_d$  – негативний диференціальний опір ( $R_d < 0$ );

$C$  – зарядна ємність  $p$ - $n$ -переходу;

$r$  – опір розтікання, що включає опір напівпровідника, контактів та підвідних проводів.

Негативний диференціальний опір у тунельного діода існуватиме, якщо дійсна частина повного опору буде меншою від нуля:

$$r + \frac{R_A}{1 + \omega^2 C^2 R_A^2} < 0$$

або

$$r < \left| \frac{R_A}{1 + \omega^2 C^2 R_A^2} \right| \quad (1)$$

При великих частотах нерівність (1) не виконуватиметься, і, виходить, тунельний діод не матиме негативного диференціального опору.

Гранична частота, визначена з рівності нулю дійсної складової повного опору діода, становить:

$$\omega_{\omega} = \frac{1}{C|R_{\bar{A}}|} \sqrt{\frac{|R_{\bar{A}}|}{r} - 1} \quad (2)$$

Максимальне значення граничної частоти дістанемо за умови:

$$|R_{\bar{A}}| = 2r \quad (3)$$

Підставляючи (2) в (3), маємо:

$$\omega_{\omega}^{\max} = \frac{1}{C|R_{\bar{A}}|},$$

тобто максимальна частота електронних коливань у тунельного діода обернено пропорційна ємності та негативному диференціальному опору.

Характеристики тунельних діодів слабо чутливі до змін температури, впливу світла та навколишнього середовища. Їх витотовляють з германію, кремнію, арсеніду галію та інших напівпровідникових матеріалів з малими ефективними масами електронів.

На основі тунельних діодів створюють малoshумливі підсилювачі змінного струму НВЧ діапазону, генератори із самозбудженням, різного роду перемикачі, логічні схеми та інші прилади й функціональні пристрої.

**Логічні схеми на тунельних діодах.** Такі схеми визначаються простотою і великою швидкістю, можуть працювати в широкому інтервалі температур.

На рис. 3 показано принципову схему «АБО» та її вольт-амперні характеристики. Струм  $I_n$  визначається послідовно увімкненими опорами джерела напруги та навантаження. Величину  $I_n$  підбирають такою, щоб пряма навантаження перетинала ВАХ тунельного діода в трьох точках, причому стійкими станами є положення *а*, що відповідає закритому стану, та положення *б*, що відповідає відкритому стану діода.

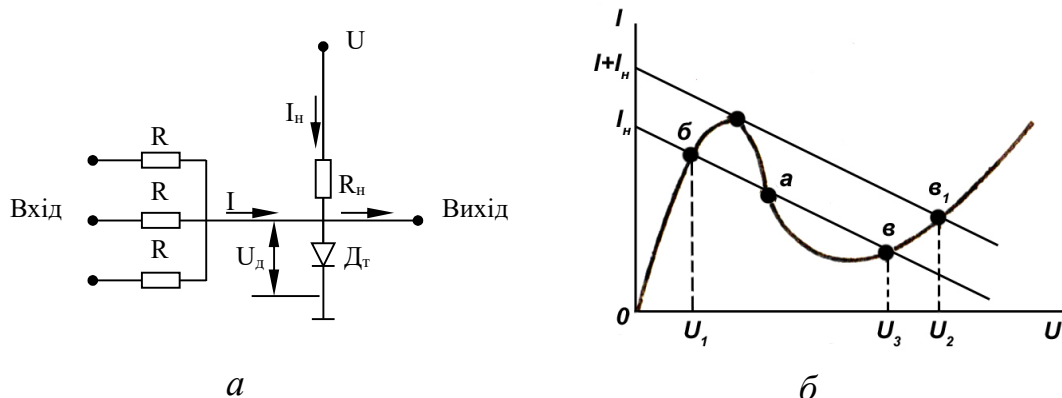


Рис.3. Принципова схема «АБО» на тунельному діоді (а) та вольт-амперні характеристики до неї (б)

У вихідному положенні система знаходиться в стані  $\delta$  - відкритому. При подачі сигналу на вхід пряма навантаження переміститься вертикально вгору, як показано на рис.3,б, і стійкому стану відповідатиме єдине положення  $\delta$ . Отже, на виході буде стрибок напруги від  $U_1$  до  $U_2$ . При вимкненні сигналу робоча точка переміститься з положення  $\delta_1$  у положення  $\delta$  якому відповідає напруга  $U_3$ . Система у цьому стані залишиться доти, доки не відключиться джерело напруги  $U$  або не буде подано на вхід імпульс негативної полярності. Таке переключення з відкритого стану  $\delta$  в закритий  $\delta$  можна виконати, подаючи імпульс на вхід 1, 2 або 3.

Ця схема може працювати і як схема «І». Для цього слід знизити величину струму  $I_n$  джерела живлення і на вхід 1-2-3 подавати імпульси, кожний з яких самостійно неспроможний переключити тунельний діод в положення  $\delta_1$ . Графічну побудову вольт-амперних характеристик для схеми «І» показано на рис.4.

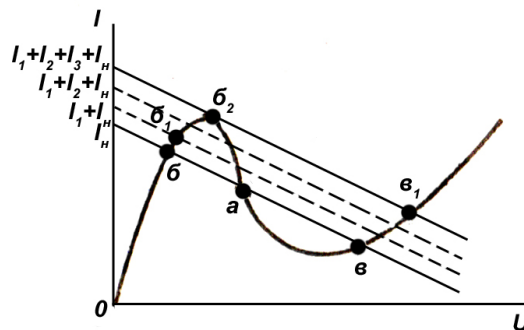
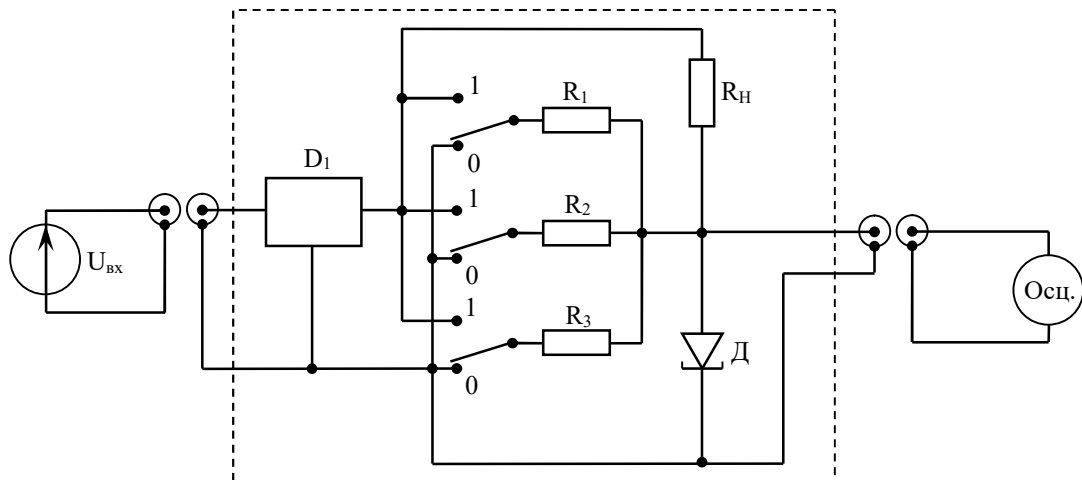


Рис.4. Графічна побудова вольт-амперних характеристик для схеми «І» на тунельному діоді

Якщо на один з виходів подати сигнал, то схема не переключиться в стан з більшим опором, а робоча точка перейде в положення  $\delta_1$ . При подачі сигналів на два входи одночасно робоча точка залишається в області низької напруги. Якщо ж на всі три входи імпульси надійдуть одночасно, то схема переключиться в стан високого опору.

## 2. Порядок виконання лабораторної роботи

### 2.1. Схема лабораторного стенда



Умовні позначення:

$D_1$  – лінійний стабілізатор напруги на 1 В;

$R_1, R_2, R_3$  – вхідні резистори схеми;

$R_H$  – навантажувальний резистор;

$D$  – тунельний діод AI301B;

$U_{BX}$  – джерело живлення схеми;

Осц. – осцилограф.

### 2.2. Порядок виконання роботи

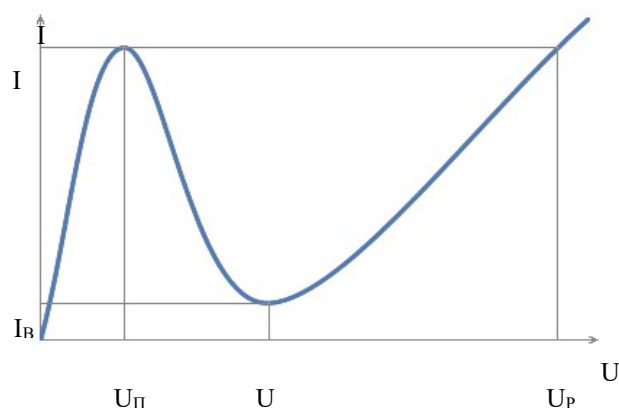
1. Ввімкнути джерело живлення логічних схем і осцилограф.
2. Підключити логічну схему А до джерела живлення і до осцилографа.
3. Перевести перемикачі вхідних сигналів у положення «0».
4. Ввімкнути схему.
5. Виставити необхідну комбінацію вхідних сигналів і визначити за показами осцилографа відповідне логічне значення на виході схеми.
6. Вимкнути схему.
7. Повторити п. 3-6 для кожної комбінації вхідних сигналів.
8. Відключити осцилограф та джерело живлення від логічної схеми А і підключити їх до логічної схеми В.
9. Повторити п. 3-7 для логічної схеми В.
10. Вимкнути осцилограф і джерело живлення логічних схем і відключити їх від логічної схеми В.
11. Отримати у викладача варіант завдання на розрахунок логічної схеми.

### Варіанти розрахункового завдання:

| Вар. | Діод   | Лог. функція | $U_{жив}, В$ | $U_{"1"}, В$ | Вар. | Діод   | Лог. функція | $U_{жив}, В$ | $U_{"1"}, В$ |
|------|--------|--------------|--------------|--------------|------|--------|--------------|--------------|--------------|
| 1    | AI301A | I            | 0,8          | 0,8          | 14   | AI301Б | АБО          | 1            | 1,1          |
| 2    | AI301Б | I            | 0,8          | 0,9          | 15   | AI301В | АБО          | 1            | 1,2          |
| 3    | AI301В | I            | 0,8          | 1            | 16   | AI301Г | АБО          | 1,1          | 0,8          |
| 4    | AI301Г | I            | 0,8          | 1,1          | 17   | AI301А | I            | 1,1          | 0,9          |
| 5    | AI301А | АБО          | 0,8          | 1,2          | 18   | AI301Б | I            | 1,1          | 1            |
| 6    | AI301Б | АБО          | 0,9          | 0,8          | 19   | AI301В | I            | 1,1          | 1,1          |
| 7    | AI301В | АБО          | 0,9          | 0,9          | 20   | AI301Г | I            | 1,1          | 1,2          |
| 8    | AI301Г | АБО          | 0,9          | 1            | 21   | AI301А | АБО          | 1,2          | 0,8          |
| 9    | AI301А | I            | 0,9          | 1,1          | 22   | AI301Б | АБО          | 1,2          | 0,9          |
| 10   | AI301Б | I            | 0,9          | 1,2          | 23   | AI301В | АБО          | 1,2          | 1            |
| 11   | AI301В | I            | 1            | 0,8          | 24   | AI301Г | АБО          | 1,2          | 1,1          |
| 12   | AI301Г | I            | 1            | 0,9          | 25   | AI301А | I            | 1,2          | 1,2          |
| 13   | AI301А | АБО          | 1            | 1            | 26   | AI301Б | I            | 1,3          | 1,3          |

### Параметри тунельних діодів:

|             | AI301A | AI301Б | AI301В | AI301Г |
|-------------|--------|--------|--------|--------|
| $I_{П}, мА$ | 2      | 5      | 5      | 10     |
| $U_{П}, В$  | 0,18   | 0,18   | 0,18   | 0,18   |
| $I_{В}, мА$ | 0,25   | 0,625  | 0,625  | 1,25   |
| $U_{В}, В$  | 0,4    | 0,5    | 0,5    | 0,45   |
| $U_{Р}, В$  | 0,75   | 1      | 1,15   | 0,9    |



### 2.3. Обробка результатів

1. На основі отриманих таблиць істинності визначити логічні функції досліджуваних схем.
2. Провести розрахунок логічної схеми відповідно до отриманого варіанта розрахункового завдання.
3. Написати висновки по роботі.

#### Вимоги до звіту:

Звіт оформлюється на листах А4 у друкованій або рукописній формі і повинен містити:

- титульний аркуш;
- мету роботи;
- порядок виконання роботи;
- експериментальні результати у табличному та графічному вигляді;
- обробку результатів;
- висновки (включаючи аналіз експериментальних даних та даних отриманих в результаті їх обробки).

## Контрольні питання

1. Що таке тунельні діоди?
2. Принцип роботи тунельного діода
3. Ширина  $p$ - $n$  переходу тунельного діоду
4. Вольт-амперна характеристика тунельного діода
5. Якісне пояснення вольт-амперної характеристики тунельного діода
6. Еквівалентна схема тунельного діода
7. Час тунелювання в тунельному діоді
8. Повний опір тунельного діода
9. Гранична частота роботи тунельного діода
10. Напрямки застосування тунельних діодів
11. Таблиця істинності логічної функції «АБО» з трьома вхідними сигналами
12. Таблиця істинності логічної функції «І» з трьома вхідними сигналами
13. Принципова електрична схема логічних функцій на тунельному діоді
14. Принцип побудови логічної функції «АБО» на тунельному діоді
15. Принцип побудови логічної функції «І» на тунельному діоді

## Список літератури

1. Кравченко О. П. Фізичні основи функціональної мікроелектроніки. – К.: Либідь, 1993.- 216с.
2. Руденко В.С., Ромашко В. Я., Трифонюк В.В. Промислова електроніка. – К.: Либідь, 1993.- 432 с.

## Лабораторна робота №4

### Дослідження лінії затримки на поверхневих акустичних хвилях

**Мета роботи:** Вивчення принципу дії, конструкцій та методики розрахунку ліній затримки на поверхневих акустичних хвилях (ЛЗ на ПАХ). Експериментально дослідити основні характеристики ЛЗ на ПАХ.

#### 1. Теоретичні відомості

##### 1.1. Класифікація та принцип дії функціональних пристроїв на ПАХ

Функціональні пристрої, принцип дії яких ґрунтується на збудженні, поширенні та детектуванні поверхневих акустичних хвиль (ПАХ), набувають все більшої актуальності. Найперспективнішою галуззю застосування цих пристроїв є системи обробки інформації в різноманітних галузях сучасної техніки - радіотехніці, телебаченні, зв'язку, інформатиці, сейсмології. Поверхневі акустичні хвилі являють великий інтерес для застосування їх у системах обробки інформації завдяки їхнім унікальним властивостям, що забезпечують створення функціональних пристроїв малих розмірів, високих електричних параметрів і надійності з використанням традиційної технології мікроелектроніки.

Поверхневі акустичні хвилі мають низьку швидкість поширення порівняно з електромагнітними хвилями, а довжина ПАХ приблизно в  $10^5$  менша від електромагнітних хвиль тієї самої частоти, тому функціональні пристрої на ПАХ мають значно менші розміри й масу, ніж електромагнітні пристрої. Поверхневі акустичні хвилі поширюються вздовж поверхні твердого тіла і локалізовані поблизу її поверхні, тому ними можна керувати в будь-якій точці шляху. Це дає широкі можливості для створення різноманітних функціональних пристроїв. Важливим достоїнством функціональних пристроїв на ПАХ є те, що вони сумісні з технологією інтегральних схем і фотолітографічними методами формування електродів.

Найбільш ефективним і поширеним методом збудження та прийому ПАХ є використання зустрічно-штирових перетворювачів. Вони являють собою гребінки металевих електродів, вставлених один в один, кожна з яких сполучена із спільною контактною шиною. Зустрічно-штирові перетворювачі наносяться на поліровану поверхню орієнтованого п'єзоелектрика методом фотолітографії. Найбільш широке використання знайшли п'єзоелектричні кристали ніобату літію, германату вісмута, кристалічний кварц, кристалічні плівки ( $ZnO$ ,  $CdS$ ,  $AlN$ ) та п'єзокераміка.

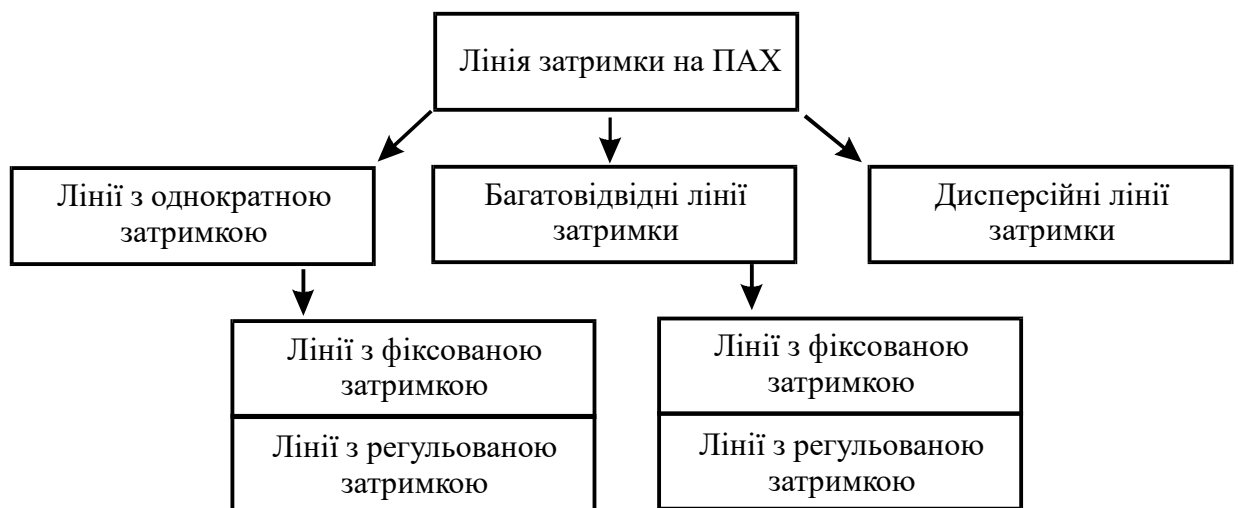
При прикладенні до контактних шин змінної електричної напруги виникає сконцентоване біля поверхні електричне поле, розподіл якого між електродами повторює просторовий період електродів. Завдяки п'єзоелектричному зв'язку (зворотному п'єзоелектричному ефекту) створене



електричне поле збуджує відповідний розподіл пружної деформації: локалізоване біля вільної поверхні електричне поле перетворюється на поверхневу акустичну хвилю. Поверхневі акустичні хвилі поширюються за двома перпендикулярними до довжини електродів напрямками. Ефективність такого перетворення буде максимальна на так званій синхронній частоті, коли час поширення поверхневої хвилі на відстань, що дорівнює одному періоду зустрічно-штирового перетворювача, дорівнює періоду збудження електричного поля. Приймання ПАХ здійснюється за допомогою другого аналогічного перетворювача, внаслідок якого пружні напруження завдяки прямому п'єзоелектричному ефекту перетворюються на електричну напругу.

Зустрічно-штировий перетворювач випромінює не лише ПАХ, а й об'ємні акустичні хвилі, а це спричиняє ряд труднощів: знижується рівень енергії, яка витрачається на збудження ПАХ; між поверхневими та об'ємними хвилями існує зв'язок, який змінює характер випромінювання ПАХ; об'ємні хвилі, які поширюються поблизу поверхні, інтерферують з ПАХ і спотворюють вихідні характеристики. Перешкоди можуть виникати також при відбиванні об'ємних хвиль від нижньої та бокових поверхностей, а поверхневих хвиль від бокових поверхностей звукопроводу. Використовуючи поглиначі або розсіюючі шари, у багатьох випадках небажані сигнали можна погасити.

Лінії затримки на ПАХ є найпростішими пристроями на поверхневих акустичних хвилях. Класифікація ЛЗ на ПАХ приведена на рис.1.

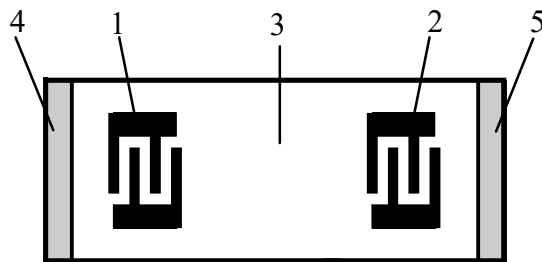


*Рис.1. Класифікація ліній затримки на ПАХ*

До ліній з однократною затримкою відносяться ЛЗ, що мають один вхідний і один вихідний перетворювачі ПАХ. Лінії, в яких хвиля, збуджена вхідним зустрічно-штировим перетворювачем, багатократно взаємодіє з рядом вихідних перетворювачів, отримали назву ліній затримки з багатократною затримкою. В залежності від функціонального призначення лінії з однократною затримкою поділяються на лінії з фіксованою та регульованою затримкою сигналу. У деяких випадках такий поділ

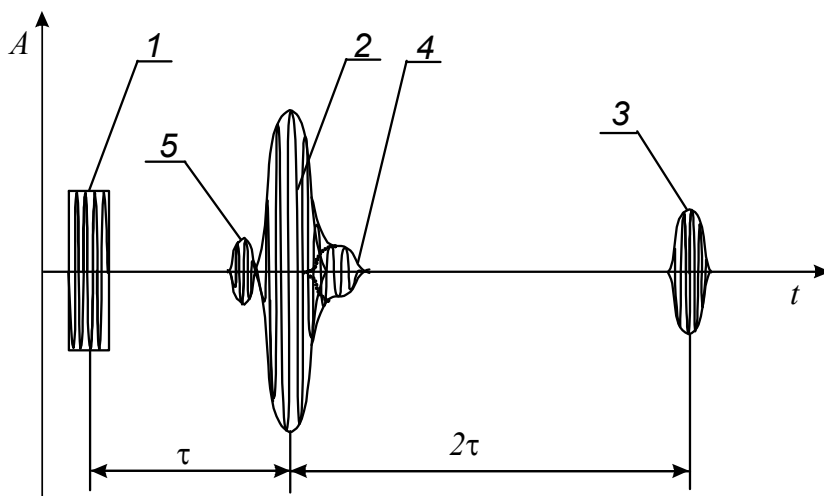
справедливий і для ліній з багатократною затримкою, в яких також можливе регулювання затримки по окремим відводам. Самостійним класом є дисперсійні лінії, в яких величина затримки залежить від частоти.

В лабораторній роботі досліджується ЛЗ на ПАХ з однократною затримкою (рис.2), яка має два однакових зустрічно-штирових перетворювача 1 і 2, сформованих методами фотолітографії на полірованій пластині ніобату літію 3, по краях звукопроводу нанесено поглинаюче покриття 4 та 5.



*Рис.2. Топологічна схема лінії затримки на ПАХ  
1,2 – зустрічно-штирові перетворювачі  
3 – пластина ніобіту літію  
4,5 – поглинаюче покриття*

При подачі на вхідний перетворювач 1 радіосигналу, частота якого близька або співпадає з частотою акустичного синхронізму перетворювача, він збуджує ПАХ, яка розповсюджується у двох протилежних напрямках, тобто до вихідного перетворювача і в протилежну сторону до звукопоглинача. Хвиля, яка розповсюджується до вихідного перетворювача, частково перетворюється в електричний сигнал та поглинається навантаженням. Значний внесок в спотворення імпульсного відгуку і амплітудно-частотної характеристики лінії затримки вносить відбиття ПАХ від перетворювачів. Імпульсні відгуки ЛЗ на ПАХ приведено на рис.3.



*Рис.3. Імпульсний відгук ЛЗ на ПАХ*

Сигнал 1 відповідає електричному сигналу, який поступає на вхідний зустрічно-штировий перетворювач, затриманий сигнал 2 зміщений по відношенню до вхідного сигналу на час затримки  $\tau = L/V$ , де  $L$  - відстань між перетворювачами, а  $V$  - швидкість розповсюдження ПАХ. Поява сигналу 3 обумовлена відбиттям основної хвилі від вихідного перетворювача і повторним відбиттям цієї хвилі від електродів вхідного перетворювача. Таким чином хвиля, що генерує цей сигнал, тричі проходить відстань між перетворювачами.

Необхідно також відмітити ще два сигнали, які пов'язані із другорядними акустичними ефектами. Один із них – сигнал 4, який обумовлений багатократними відбиттями ПАХ в електродній структурі вхідного та в меншій мірі вихідного перетворювача, викликає “розмивання” спаду основного затриманого сигналу. Сигнал 5 обумовлений розповсюдженням між вхідним та вихідним перетворювачами об'ємної акустичної хвилі.

### Методика розрахунку акустoeлектронних параметрів ЛЗ на ПАХ

Характеристики зустрічно-штирових перетворювачів впливають на параметри ПАХ-пристроїв, особливо на ширину смуги пропускання, внесені втрати основного сигналу і рівень трьохкратного сигналу. Для зменшення внесених втрат ПАХ-пристрої часто містять узгоджувальні елементи. У цьому випадку величина втрат і ширина смуги пропускання стають пов'язаними між собою і ця залежність визначається значенням коефіцієнта електромеханічного зв'язку.

На рис. 4 показано послідовну еквівалентну схему ЗШП (а) і схему компенсації реактивного опору перетворювача (б).

Послідовна електрична схема ЗШП містить послідовне з'єднання статичної ємності  $C_t$ , активної і реактивної складових опору випромінювання  $R_a(f)$  і  $X_a(f)$ , які визначаються співвідношеннями:

$$C_t = NC_s W, \quad (1)$$

де  $C_s$  - погонна ємність пари електродів ЗШП (кварц  $ST$ -зрізу -  $C_s = 0,55 \text{ нФ/см}$ , ніобат літію

$YZ$ -зрізу -  $C_s = 4,6 \text{ нФ/см}$ , танталат літію  $YZ$ -зрізу -  $C_s = 5,7 \text{ нФ/см}$ );  $W$  - апертура ЗШП;

$$R_a(f) = R(f_0) \left[ \frac{\sin Y}{Y} \right]^2; \quad (2)$$

$$X_a(f) = R(f_0) \frac{\sin 2Y - 2Y}{2Y^2}, \quad (3)$$

де  $R(f_0)$  - активна складова опору випромінювання при резонансі:

$$R_a(f_0) = \frac{1}{8k^2 f_0 C_t N}, \quad (4)$$

де  $Y = N\pi\delta/2$ ;  $N$  - кількість пар електродів;  $f_0$  - центральна частота;  $\delta = (f_0 - f)/f_0$  - відносна смуга пропускання на рівні  $-3$  дБ.

Для узгодження перетворювачів із зовнішніми ланцюгами використовується послідовна індуктивність  $L$ , підібрана з урахуванням компенсації статичної ємності перетворювача і яка визначається із формули:

$$L = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_s W N} . \quad (5)$$

При цьому індуктивність разом із статичною ємністю перетворювача  $C_t$  утворюють послідовний електричний контур, електрична добротність якого залежить від числа пар електродів перетворювача  $N$  і коефіцієнта електромеханічного зв'язку  $k^2$ :

$$Q_E = \frac{\pi}{4k^2 N} . \quad (6)$$

Акустична добротність перетворювача  $Q_a$  залежить лише від часового запізнювання сигналу в ЗШП або від числа пар електродів зустрічно-штирового перетворювача, тобто:

$$Q_a = f_0/\Delta f = N . \quad (7)$$

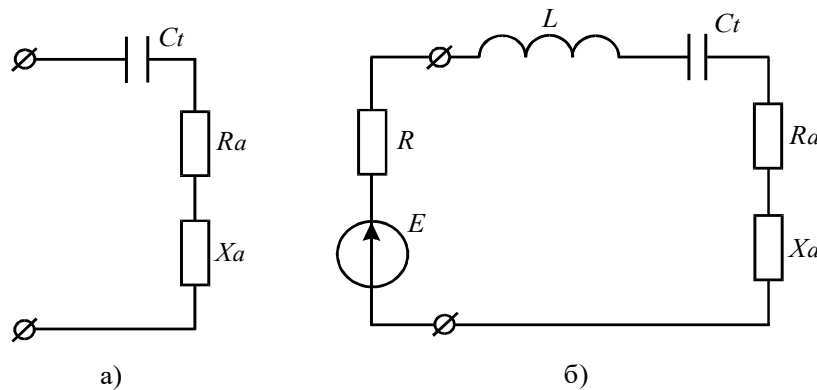


Рис. 4. Послідовна еквівалентна схема ЗШП (а) і схема компенсації реактивного опору перетворювача (б)

Оптимальне число пар електродів перетворювача  $N_0$  для даного матеріалу вибирається із умови рівності акустичної й електричної добротностей ( $Q_E = Q_a$ ), звідки знаходимо:

$$N_0 = \sqrt{\frac{\pi}{4k^2}} \quad (8)$$

При оптимальному числі електродів ЗШП смуга пропускання електричного контуру дорівнює смузі акустичного, тобто забезпечується повне узгодження електроакустичного тракту в робочій смузі частот або оптимальне електроакустичне узгодження. Безумовно, оптимальне узгодження перетворювача в робочій смузі частот є одним із головних умов, що забезпечують ефективну роботу перетворювача і низький рівень відбиття ПАХ у тракті. Проте іншою, не менше важливою умовою є електричне

узгодження із зовнішніми ланцюгами, тобто забезпечення рівності вхідного (вихідного) опору перетворювача й опору джерела (навантаження). Вважаючи опір зовнішніх ланцюгів незмінним у смузі частот, під електричним узгодженням розуміють виконання співвідношення  $R_a(f_0) = R_n$ , де  $R_n$  - опір зовнішнього ланцюга.

Для забезпечення узгодження у смузі частот опір навантаження або генератора та опір випромінювання перетворювача повинні вибиратися із умови:

$$\frac{R_n}{R_a(f_0)} = \frac{Q_E(N)}{Q_a(N)}, \quad (9)$$

де  $Q_E(N)$  і  $Q_a(N)$  - електрична й акустична добротності перетворювача, що відповідають обраному  $N$ :

$$Q_E(N) = \frac{1}{\pi R_a(f_0) f_0 C_s W N} \quad (10)$$

;

$$Q_a(N) = N \quad (11)$$

Звідки

$$\rho = \frac{R_n}{R_a} = \frac{Q_E}{Q_a}. \quad (12)$$

Ступінь неузгодженості перетворювача  $\rho$  однозначно визначає енергетичні співвідношення в лінії затримки. При падінні ПАХ на перетворювач частина енергії відбивається від нього, частина перетворюється в електричний сигнал і виділяється в навантаженні, а частина проходить у попередньому напрямку. Коефіцієнти відбиття ПАХ  $B_{11}$ , проходження  $B_{21}$  і поглинання  $B_{31}$  визначаються такими співвідношеннями:

$$B_{11} = -10 \lg \frac{1}{(1 + \rho)^2}; \quad (13)$$

$$B_{21} = -10 \lg \frac{\rho^2}{(1 + \rho)^2}; \quad (14)$$

$$B_{31} = -10 \lg \frac{2\rho}{(1 + \rho)^2}. \quad (15)$$

Відбиття акустичної хвилі служить джерелом помилкового сигналу, рівень якого визначається співвідношенням:

$$B_{ПС} = B_{11}^{вх} + B_{11}^{вх}, \quad (16)$$

де  $B_{11}^{вх}$  і  $B_{11}^{вих}$  - коефіцієнти відбиття від вхідного та вихідного перетворювачів.

Таким чином, визначивши ступінь неузгодженості перетворювачів, можна обчислити внесені втрати ПАХ-пристрою. При цьому варто врахувати існування поряд із неузгодженістю перетворювачів інших джерел втрат:

теплових втрат на омичному опорі електродів перетворювачів; згасання акустичного сигналу в процесі поширення; дифракційної розбіжності акустичного променя; генерації об'ємних хвиль. Оцінка перерахованих втрат може бути зроблена лише після вибору конструктивних параметрів перетворювачів і опору випромінювання  $R_a(f_0)$ .

Сумарні внесені втрати можна оцінити як:

$$B = B_{31}^{ex} + B_{31}^{in} . \quad (17)$$

### Характеристики п'єзоелектриків для функціональних пристроїв на ПАХ

Основою любого приладу на ПАХ є п'єзоелектрик, в якому проходить збудження, детектування і розповсюдження поверхневих акустичних хвиль. Ось чому властивості цих матеріалів визначають параметри приладів.

Швидкість розповсюдження хвиль по п'єзоелектрику  $V$  є основним параметром. Знаючи його, неважко визначити період ЗШП для центральної частоти  $f_0$  пристрою:  $\lambda = V / f_0$ , де  $\lambda$  - довжина хвилі або період ЗШП. З цього випливає, що швидкість розповсюдження ПАХ визначає граничне значення верхніх частот, а також і розміри пристрою. Так, наприклад, процес фотолітографії дозволяє створювати мінімальні розміри елементів в 1 мкм, тобто середня частота пристрою на ніобаті літію становить близько 1000 МГц, а для ЗШП з подвійними електродами (що необхідно для зменшення спотворень в пристроях) вона не перевищить 500 МГц. Для матеріалів із більш низькою швидкістю розповсюдження ПАХ ця частота ще зменшиться при тій самій технології. Таким чином, можна зробити висновок, що зменшення швидкості розповсюдження ПАХ при інших рівних умовах веде до підвищення робочої частоти пристрою та зменшення його габаритів.

Іншим важливим параметром матеріалу є його п'єзоелектричні властивості. Мірою п'єзоелектричних властивостей для ПАХ є коефіцієнт електромеханічного зв'язку  $k^2 = 2\Delta V / V$ , де  $\Delta V$  - різниця швидкостей розповсюдження ПАХ на вільній поверхні і на поверхні, на яку нанесена ідеально тонка металева плівка. Щоб втрати енергії в пристрої були мінімальні необхідно виконати умову:  $\Delta f / f \leq 2k / \sqrt{\pi}$ . Таким чином, для отримання широкосмугових пристроїв на ПАХ потрібні матеріали з більш високим коефіцієнтом електромеханічного зв'язку. Як видно із приведеної нижче таблиці № 1, найбільший коефіцієнт має ніобат літію, найменший - кварц.

Таблиця № 1.

Фізичні параметри акустичних кристалів

| Матеріал | Орієнтація | Швидкість ПАХ<br>$V$ , м/с | $k^2$ , % | ТКЧ·10 <sup>6</sup> , 1/°С |
|----------|------------|----------------------------|-----------|----------------------------|
| Кварц    | Y, X       | 3159                       | 0,23      | -24                        |
|          | ST, X      | 3158                       | 0,16      | 0                          |

|                                    |                      |              |              |          |
|------------------------------------|----------------------|--------------|--------------|----------|
| LiNbO <sub>3</sub>                 | Y, Z<br>Y+128°, X    | 3488<br>4000 | 4,5<br>5,78  | 94<br>72 |
| LiTaO <sub>3</sub>                 | Y, Z<br>X,<br>Y+112° | 3230<br>3259 | 0,74<br>0,74 | 35<br>18 |
| Bi <sub>12</sub> SiO <sub>20</sub> | (001),<br>[110]      | 1700         | 1,8          | 118      |

Приведені в таблиці № 1 фізичні параметри акустичних кристалів є дуже важливими, оскільки швидкість розповсюдження ПАХ сильно залежить від площини по відношенню до осі анізотропії, в якій ця хвиля розповсюджується.

Необхідно прийняти також до уваги, що розширення відносної смуги пропускання призводить до появи додаткових втрат, а звуження - до зростання спотворень.

Кожний матеріал має свій власний температурний коефіцієнт частоти (ТКЧ), що визначається як  $\Delta f_1 / f \Delta T$ , де  $\Delta T = T_1 - T_2$  - різниця температур експлуатації. Звичайно ці температури коливаються в інтервалі  $T = (-60... + 85) ^\circ \text{C}$ . Найкращу температурну стабільність з усіх п'єзоелектриків має кварц, але низький коефіцієнт електромеханічного зв'язку не дозволяє використовувати його як основу для всіх пристроїв на ПАХ. П'єзоелектрики з більш високим значенням коефіцієнта електромеханічного зв'язку, на жаль, є значно менш температурно стабільними. В таблиці № 2 приведено основні характеристики деяких ліній затримки на ПАХ, що виробляються серійно.

Таблиця № 2.

Параметри ліній затримки на ПАХ

| Найменування параметрів   | Тип лінії затримки |                  |                  |
|---|--------------------|------------------|------------------|
|   | ЛЗПВ-1             | ЛЗПВ-2           | ЛЗПВ-3           |
| Номінальна частота, МГц   | 15± 0,2            | 15± 0,2          | 15± 0,2          |
| Смуга пропускання по рівню - 6 дБ, МГц, не менше                    | 6                  | 6                | 6                |
| Час затримки між вхідним сигналом і сигналом з першого відводу, мкс | 2±0,05             | 3±0,05           | 3,2±0,01         |
| Внесене згасання на останньому відводі, дБ, не більше               | 40                 | 40               | 40               |
| Температурний коефіцієнт затримки, 1/°C, не більше                  | 10 <sup>-4</sup>   | 10 <sup>-4</sup> | 10 <sup>-4</sup> |

## 2. Порядок виконання лабораторної роботи

### 2.1. Схема вимірювання

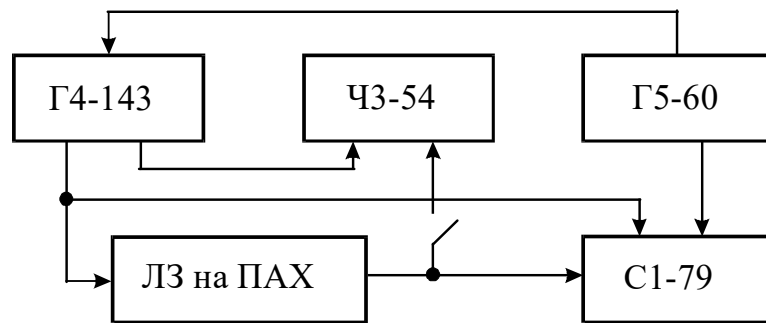


Рис.5. Структурна схема установки для дослідження ЛЗ на ПАХ

- Генератор імпульсів Г5-60;
- Генератор високочастотних сигналів Г4-143;
- Частотимірювач ЧЗ-54;
- Осцилограф універсальний С1-79;
- Лінія затримки на поверхневих акустичних хвилях.

### 2.2. Порядок виконання роботи

1. Вивчити інструкції по експлуатації вимірювальних приладів.
2. Вивчити особливості конструкцій та експлуатації ЛЗ на ПАХ.
3. Підготувати лабораторну установку для вимірювання основних параметрів ЛЗ на ПАХ (рис.5).
4. Керуючись інструкціями з експлуатації вимірювальних приладів, за допомогою осцилографа та частотимірювача визначити:
  - параметри високочастотних імпульсів (рис.6 ) на вході і на виході ЛЗ на ПАХ для трьох значень відеоімпульсів, що модулюють високочастотні коливання високочастотного генератора Г4-143;

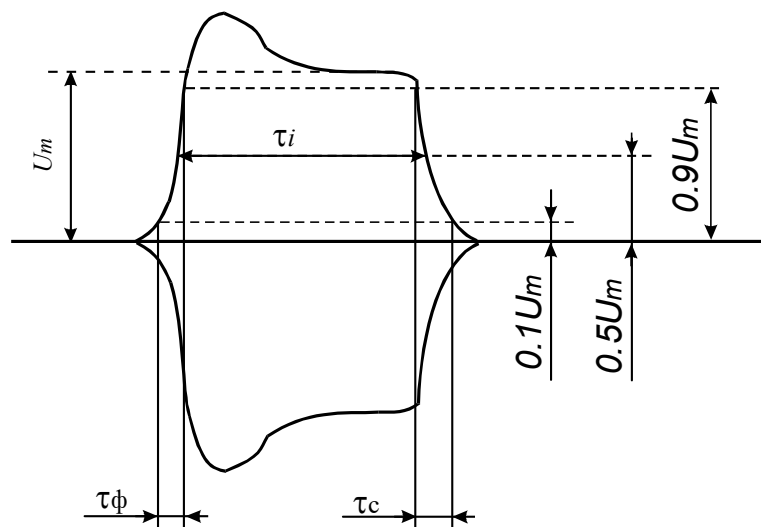


Рис.6. Форма вихідного високочастотного імпульсу



• внесені затухання  $\alpha$  для основного сигналу і ослаблення троекратного проходження  $\gamma$ :

$$\alpha(dB) = 20 \lg \frac{U_{m1}}{U_{m2}} ; \quad (18)$$

$$\gamma(dB) = 20 \lg \frac{U_{m1}}{U_{m3}} , \quad (19)$$

де  $U_{m1}$  - амплітуда високочастотного імпульсу на вході лінії затримки;  
 $U_{m2}$  та  $U_{m3}$  - відповідно амплітуди високочастотних імпульсів основного та троекратного проходження;

- час затримки основного сигналу і сигналу троекратного проходження;
- значення несучої частоти  $f_n$  високочастотних імпульсів і порівняти їх з показниками частотовимірювача (генератор Г4-143 переключасться в безперервний режим роботи);
- побудувати осцилограми імпульсів;
- результати вимірювання занести в таблицю.

### 3. Вимоги до звіту

Звіт повинен містити:

1. Мету роботи.
2. Порядок виконання роботи.
3. Експериментальні результати в табличному та графічному вигляді.
4. Висновки.

## Контрольні питання

1. Поясніть явища прямого та оберненого п'єзоелектричних ефектів.
2. Якими основними параметрами характеризуються п'єзоелектричні матеріали ?
3. Що таке поверхнева акустична хвиля ? Назвіть типи ПАХ та їх властивості.
4. Якими методами збуджуються поверхневі акустичні хвилі ?
5. Поясніть принцип дії зустрічно-штирового перетворювача ПАХ.
6. Що характеризує коефіцієнт електромеханічного зв'язку і яким чином його можна визначити ?
7. Якими конструктивними параметрами визначаються амплітудно-частотна та фазочастотна характеристики лінії затримки на ПАХ ?
8. Які причини спотворення вихідного сигналу ЛЗ на ПАХ ?
9. Яким співвідношенням визначається оптимальне число електродів ЗШП ?
10. Що характеризують електрична та акустична добротності ЗШП ?
11. Поясніть співвідношення для активної і реактивної складових опору випромінювання ЗШП.
12. Для чого необхідна компенсація реактивної складової опору випромінювання ЗШП?
13. Як розраховується рівень помилкового сигналу та сумарні втрати лінії затримки на ПАХ?
14. Який принцип дії дисперсійної лінії затримки на ПАХ ?
15. Який принцип дії керованої затримки на ПАХ ?
16. Що характеризує температурний коефіцієнт затримки ЛЗ на ПАХ ?
17. Які основні параметри притаманні ЛЗ на ПАХ ?
18. Поясніть структурну схему установки для дослідження ЛЗ на ПАХ.
19. Поясніть методику визначення параметрів ЛЗ на ПАХ по експериментальним даним.
20. Охарактеризуйте типи ЛЗ на ПАХ , їх конструктивно-технологічні особливості та застосування.

## Список літератури

1. Речицкий В.И. Акустоэлектронные радиокомпоненты: Элементы и устройства на поверхностных акустических волнах - М.: Сов.Радио, 1980. - 264с.
2. Речицкий В. И. Акустоэлектронные радиокомпоненты. - М.: Радио и связь, 1987. - 192 с.
3. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах: Пер. С англ. - М.: Радио и связь, 1990. - 416 с.
4. Фильтры на поверхностных акустических волнах: расчёт, технология, и применение / Под ред. Г. Мэттьюза. - М.: Радио и связь.- 1981. -472 с.
5. Орлов В.С., Бондаренко В.С.. Фильтры на поверхностных акустических волнах. - М.: Радио и связь, 1984. - 272 с.
6. Дмитриев В. В., Акпамбетов В. Б., Бронникова Е. Г. и др. Интегральные пьезоэлектрические устройства фильтрации и обработки сигналов: Справ. пособие. - М.: Радио и связь. - 1985. - 176 с.
7. Дворников А.А., Огурцов В.И., Уткин Г.М.. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах. - М.: Радио и связь, 1983. - 136 с.
8. Кравченко О.П. Фізичні основи функціональної мікроелектроніки, Київ, «Либідь», 1993, 216с.
9. Кравченко А.Ф. Физические основы функциональной электроники: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2000. – 444 с.
10. Акустические кристаллы. Справочник / Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Чкалова В.В. и др.; под ред. М.П.Шаскольской . – М.: Наука, 1982. – 632 с.
11. Кондратьев С.Н., Петржик Е.А. Материалы для устройств на поверхностных акустических волнах // Зарубежная радиоэлектроника. -1986.- №1. -.31-41.
12. Оформление материалов самостоятельной работы: Рекомендации для студентов вузов / Г.М.Болотин, В.М.Токаренко. – К.: Вища школа, 1994. – 72 с.

## **Лабораторна робота №5**

### **Дослідження смугового фільтра на поверхневих акустичних хвилях**

**Мета роботи:** Вивчення принципу дії, конструкцій та методики розрахунку фільтрів на поверхневих акустичних хвилях. Експериментально дослідити основні характеристики смугового фільтра на ПАХ.

#### **1. Теоретичні відомості**

##### **1.1. Принцип дії та методи синтезу характеристик фільтрів на ПАХ**

Фільтри на поверхневих акустичних хвилях можуть використовуватись у вхідних ланцюгах та трактах проміжної частоти систем зв'язку, телебаченні та радіолокації, в системах фільтрації сигналів, в вимірювачах швидкості та дальності, пристроях формування та обробки сигналів радіолокаційних станцій, в аналізаторах спектру та генераторах височастотних сигналів, синтезаторах та дискримінаторах частоти вимірювальної техніки, в аналогових системах автоматики та телемеханіки.

Широке розповсюдження фільтрів на ПАХ пояснюється тим, що вони мають суттєві переваги перед приладами, які працюють на об'ємних акустичних хвилях завдяки можливості простим шляхом формувати комплексну частотну характеристику. При формуванні амплітудно-частотної характеристики звичайних LC-контурів в тракті ПЧ телевізійного приймача доводиться використовувати 8...12 таких елементів, тому використання фільтрів на ПАХ зменшує габарити приблизно в 50 разів, а масу - в 20 разів.

Конструктивно фільтр на ПАХ виконується на п'єзоелектричній підкладці, матеріалом якої можуть бути монокристали ніобату літія, кварцу, германату вісмута, танталату літія, тощо. Фізична основа роботи фільтра полягає в перетворенні електричних сигналів в акустичні хвилі і навпаки. В п'єзоелектричному кристалі розповсюдження хвилі супроводжується квазістатичним електричним полем. Це дає можливість збуджувати поверхневі акустичні хвилі в таких кристалах металевими електродами і працювати на досить високих частотах ( від десятків МГц до 3 ГГц ). Збудниками і приймачами ПАХ використовуються двонаправлені зустрічно-штирові перетворювачі (ЗШП) - металева періодична структура, яка нанесена на поліровану поверхню п'єзоелектричного монокристалу. Топологічна схема фільтра на ПАХ показана на рис.1.

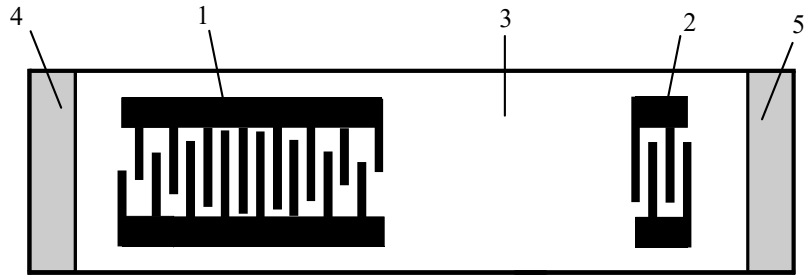


Рис.1. Топологічна схема фільтра на ПАХ

При подачі напруги на вхідний ЗШП 1 в поверхневому шарі п'єзоелектрика 3 виникають періодичні деформації, що розповсюджуються по монокристалу зі швидкістю 1500-6000 м/с, які перетворюються в електричний сигнал в вихідному перетворювачі ПАХ 2. Поглиначі ПАХ 4 та 5 забезпечують режим біжучої хвилі.

## 1.2. Імпульсна характеристика смугового фільтра на ПАХ

Якщо на вхідний ЗШП фільтра подати  $\delta$ -імпульс електричної напруги, то від перетворювача будуть розповсюджуватися поверхневі збудження, структура яких відображає структуру вхідного ЗШП. Збудження, що розповсюджуються до вихідного перетворювача, мають вигляд:

$$h_1(t) = \sum_{i=1}^{N_1} A_{1i} \delta(t - X_i / V), \quad (1)$$

де  $N_1$  - число електродів вхідного перетворювача;  $A_{1i}$  - вагові коефіцієнти електродів вхідного ЗШП, які визначаються конструкцією перетворювача;  $X_i$  - координати точок максимального збудження ПАХ;  $V$  - швидкість ПАХ.

При проходженні збудженої ПАХ під вихідним ЗШП за рахунок п'єзоефекту на електродах наводяться заряди  $q_i$ . Можна вважати, що заряди виникають в моменти часу, які відповідають проходженню імпульсів поверхневої напруги під точками максимального збудження ПАХ. Таким чином, сигнал на вихідному перетворювачі можна записати у вигляді:

$$h_2(t) = \left\{ \sum_{i=1}^{N_2} A_{2i} \delta(t - X_i / V) \right\} h_1(t) \quad (2)$$

Якщо період розміщення електродів  $d$  вхідного і вихідного перетворювачів однаковий, то вихідний сигнал складається з  $N_1 + N_2 - 1$  імпульсів:

$$h_1 = \sum_{i=1}^{N_1 + N_2 - 1} y_i \delta[t - (i - 1)\tau], \quad (3)$$

які слідують один за одним через інтервал часу  $\tau = d / V$ . Амплітуда  $i$ -го імпульсу є зважена сума імпульсів вхідного сигналу, що діє в даний момент на вихідний перетворювач:

$$y_i = \sum_{k=1}^{N_1 + N_2 - 1} A_{1k} A_{2(N_1 + 1 + k - i)} \cdot \quad (4)$$

Вираз (1) є реакцією вхідного ЗШП на  $\delta$  - імпульс і описує імпульсну характеристику вхідного перетворювача. Імпульсна характеристика вихідного перетворювача має аналогічний вигляд (співмножник у фігурних лапках формули (2)). Таким чином імпульсним відгуком всього фільтра буде згортка імпульсних характеристик вхідного та вихідного ЗШП.

### 1.3. Частотна характеристика фільтра на ПАХ

Як відомо, комплексна частотна характеристика чотирьохполосника пов'язана з його імпульсною характеристикою перетворенням Фур'є. Таким чином, знаючи  $h(t)$ , частотну характеристику фільтра на ПАХ можна записати у вигляді:

$$H(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} h(t) \cdot e^{-j\omega \cdot t} dt \quad (5)$$

За допомогою співвідношень (1)...(5) можна у загальному вигляді розв'язати задачу аналізу фільтра на ПАХ, тобто знайти коефіцієнт передачі по відомій геометрії і вагових коефіцієнтах.

Але найбільш важливим завданням при проектуванні фільтрів на ПАХ є не аналіз характеристик вже готових фільтрів, а синтез - по заданій частотній характеристиці  $H(\omega)$  визначити геометрію фільтра, тобто знайти число, положення і конфігурацію електродів кожного ЗШП. Задача вирішується в два етапи. Перший етап полягає в знаходженні вагових коефіцієнтів імпульсної характеристики кожного ЗШП, а ціль другого - знаходження геометрії конкретної реалізації фільтра.

На першому етапі по відомій функції  $H(\omega)$  потрібно визначити  $N_1$  і  $N_2$  і всі  $A_{1i}$  і  $A_{2i}$  імпульсних характеристик. Основною задачею при проектуванні будь-якого фільтра на ПАХ є зменшення рівня бокових пелюсток (рис.2). Наприклад, для однорідного ЗШП рівень бокових пелюсток  $R$  досить великий  $R = -13,46$  дБ), але вже для фільтра з двома однаковими однорідними ЗШП рівень  $R$  знижується до  $-27$  дБ. Даний результат показує шлях зниження бокових пелюсток в фільтрах на ПАХ - згладжування імпульсної характеристики фільтра до країв, тобто помноження їх на деяку убуючу до країв функцію, що називається функцією аподизації імпульсної характеристики. Як приклад функції аподизації можна назвати функцію Хеммінга:

$$W(t) = K + (1 - K) \cos^m \left( \frac{\pi t}{2T} \right) \quad (6)$$

де  $2T$  - повний час імпульсного відгуку. Параметри  $K$  і  $m$  можуть бути різноманітними, проте найчастіше їх беруть  $K=0,08$  і  $m=2$ .

Рис.2. Частотна характеристика смугового фільтру

Імпульсну характеристику фільтра, який побудований з функцією аподизації Хеммінга і тип якої називається «косинус на п'єдесталі», можна записати як

$$h(t) = [K + (1-K) \cdot \cos^2(\pi \cdot t / 2T)] \cdot [U_{-1} \cdot (t+T) - U_{-1} \cdot (t-T)]. \quad (7)$$

Після виконання Фур'є-перетворення отримаємо частотну характеристику:

$$|H(f)| = \frac{1+K}{2} \cdot \frac{\sin 2\pi f T}{\pi f} + \frac{1-K}{4} \left\{ \frac{\sin 2\pi T(f - 1/2T)}{\pi(f - 1/2T)} + \frac{\sin 2\pi T(f + 1/2T)}{\pi(f + 1/2T)} \right\} \quad (8)$$

Вага імпульсного відгуку визначається із (7):

$$A_n = (-1)^n \cdot [K + (1-K) \cdot \cos^2(\pi \cdot n / 4f_0 T)]; \quad (9)$$

де  $-N_{max} \leq n \leq N_{max}$ ;  $N_{max} = 2f_0 T$ .

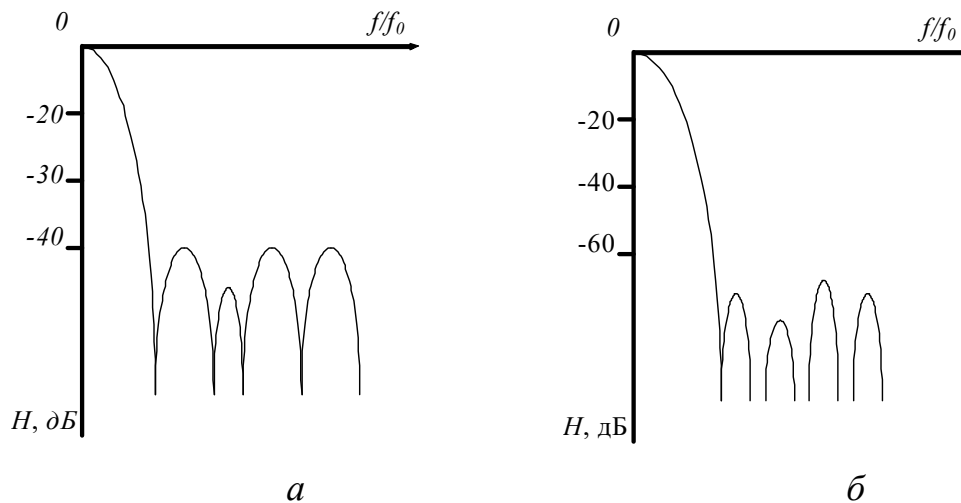
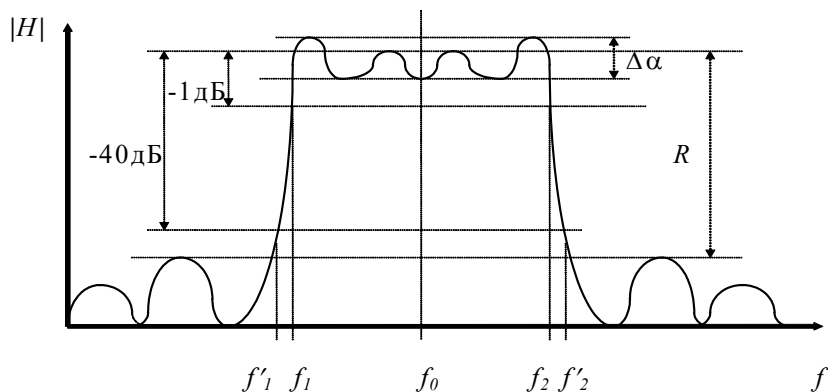


Рис.3. Частотна характеристика фільтра що має:

(а) ЗШП з аподизацією по Хеммінгу

(б) ЗШП з аподизацією по Хеммінгу і однорідний ЗШП з вдвічі меншим числом електродів



Загальний вигляд частотної характеристики ЗШП, аподизованого по Хеммінгу, зображено на рис.3а. Незавжди пересвідчитись, що аподизація по Хеммінгу забезпечує рівень подавлення бокових пелюсток на рівні – 42,5 дБ.

Для подальшого зменшення бокових пелюсток можна використовувати комбінацію з ЗШП, аподизованого по Хеммінгу, та однорідного ЗШП, число електродів якого вдвоє менше, ніж у аподизованого ЗШП. В такій комбінації перетворювачів перший нуль коефіцієнту передачі однорідного ЗШП приходить на перший боковий максимум коефіцієнта передачі аподизованого ЗШП і сумарний рівень бокових пелюсток знижується майже до –60 дБ (рис.3б). Крім аподизації згідно функції Хеммінгу можна використовувати також аподизації Чебишева, Кайзера,  $\sin X / X$  та інші.

В таблиці № 1 приведено основні характеристики деяких телевізійних фільтрів на поверхневих акустичних хвилях, що виробляються серійно.

Таблиця № 1.

Параметри телевізійних фільтрів на ПАХ

| Найменування параметрів                                | Тип фільтра |               |               |
|--|-------------|---------------|---------------|
|  | ФПЗП9-451   | ФПЗП9-458-2-1 | ФПЗП9-458-2-2 |
| Несуча частота зображення, МГц                         | 38          | 38,9          | 45,75         |
| Смуга пропускання по рівню -4,0 дБ, МГц, не менше      | 5,56        | 4,4           | 3,5           |
| Нерівномірність АЧХ в смузі пропускання, дБ, не більше | 1           | 1             | 1             |
| Внесене поглинання, дБ, не більше                      | 25          | 25            | 25            |



## 2. Порядок виконання лабораторної роботи

### 2.1. Схема вимірювання

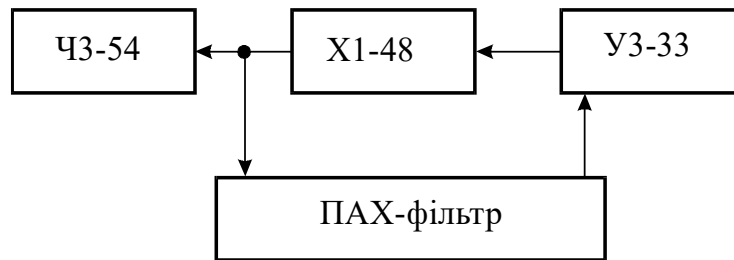


Рис.4. Структурна схема установки для дослідження ПАХ-фільтра

- Прилад для дослідження амплітудно-частотних характеристик Х1-48;
- Підсилювач широкосмуговий УЗ-33;
- Частотовимірювач ЧЗ-54;
- Смуговий фільтр на поверхневих акустичних хвилях.

### 2.2. Порядок виконання роботи

1. Вивчити інструкції з експлуатації вимірювальних приладів.
2. Вивчити особливості конструкції та експлуатації елементів на ПАХ.
3. Підготувати лабораторну установку для вимірювання характеристик фільтрів на ПАХ (рис.4.).
4. Визначити, керуючись інструкцією з експлуатації приладу Х1-48, параметри:
  - центральна частота -  $f_0$ ;
  - величина внесених втрат на центральній частоті -  $\delta_0$ ;
  - ширина смуги пропускання на рівні -3 дБ -  $\Delta f_3$  ;
  - ширина смуги пропускання на рівні -10 дБ -  $\Delta f_{10}$  ;
  - нерівномірність АЧХ в смузі пропускання  $\Delta f_3$  ;
  - ширину перехідної області -  $\gamma = (\Delta f_{10} - \Delta f_3) / 2$  ;
  - коефіцієнт форми  $K_{\text{ПР}} = \Delta f_{10} / \Delta f_3$ .

## 3. Вимоги до звіту

Звіт повинен містити:

1. Мету роботи.
2. Порядок виконання роботи.
3. Експериментальні результати в табличному та графічному вигляді.
4. Висновки.

### Контрольні питання

1. Побудова, принцип роботи, основні параметри та застосування фільтрів на ПАХ.
2. Поясніть імпульсну характеристику смугового фільтру на ПАХ.
3. Поясніть частотну характеристику смугового фільтру на ПАХ.
4. По якій причині реальна характеристика фільтра відрізняється від характеристики на основі моделі з  $\delta$  - функціями ?
5. Які види аподизації ЗШП використовуються при синтезі фільтрів на ПАХ ?
6. Поясніть аподизацію ЗШП згідно функції Хеммінга.
7. Поясніть аподизацію ЗШП згідно функції Чебишева.
8. Поясніть аподизацію ЗШП згідно функції Кайзера.
9. Поясніть аподизацію ЗШП згідно функції  $\sin X / X$ .
10. Поясніть структурну схему установки для дослідження фільтра на ПАХ.
11. Поясніть методику визначення параметрів смугових фільтрів на ПАХ по експериментальним даним.
12. Поясніть технологічний процес виготовлення пристроїв на ПАХ.

## Список літератури

1. Речицкий В.И. Акустоэлектронные радиокомпоненты: Элементы и устройства на поверхностных акустических волнах - М.: Сов.Радио, 1980. - 264с.
2. Речицкий В. И. Акустоэлектронные радиокомпоненты. - М.: Радио и связь, 1987. - 192 с.
3. Морган Д. Устройства обработки сигналов на поверхностных акустических волнах: Пер. С англ. - М.: Радио и связь, 1990. - 416 с.
4. Фильтры на поверхностных акустических волнах: расчёт, технология, и применение / Под ред. Г. Мэттьюза. - М.: Радио и связь.- 1981. -472 с.
5. Орлов В.С., Бондаренко В.С.. Фильтры на поверхностных акустических волнах. - М.: Радио и связь, 1984. - 272 с.
6. Дмитриев В. В., Акпамбетов В. Б., Бронникова Е. Г. и др. Интегральные пьезоэлектрические устройства фильтрации и обработки сигналов: Справ. пособие. - М.: Радио и связь. - 1985. - 176 с.
7. Дворников А.А., Огурцов В.И., Уткин Г.М.. Стабильные генераторы с фильтрами на поверхностных акустических волнах. - М.: Радио и связь, 1983. - 136 с.
8. Кравченко О.П. Фізичні основи функціональної мікроелектроніки, Київ, «Либідь», 1993, 216 с.
9. Кравченко А.Ф. Физические основы функциональной электроники: Учебное пособие. – Новосибирск: Изд-во Новосиб. ун-та, 2000. – 444 с.
10. Акустические кристаллы. Справочник / Блистанов А.А., Бондаренко В.С., Чкалова В.В. и др.; под ред. М.П.Шаскольской . – М.: Наука, 1982. – 632 с.
11. Кондратьев С.Н., Петржик Е.А. Материалы для устройств на поверхностных акустических волнах // Зарубежная радиоэлектроника. -1986.- №1. -.31-41.

## **Лабораторна робота № 6**

### **Енергонезалежна пам'ять**

**Мета роботи:** Ознайомлення з фізичними принципами, архітектурою та алгоритмами запису/зчитування/стирання енергонезалежної пам'яті EEPROM та Flash

#### **1. Теоретичні відомості**

За призначенням запам'ятовуючі пристрої (ЗП) діляться на короткочасні і довгострокові. У свою чергу, ЗП з довготривалим зберіганням діляться на постійні ЗП (ПЗП) і напівпостійні ЗП (НПЗП). Характерною рисою ПЗП і НПЗП є збереження інформації при відключенні джерел живлення. При цьому в ПЗП можливий лише одноразовий запис інформації, виробленої або в процесі виробництва або в результаті програмування. У НПЗП можлива багаторазова зміна інформації, що зберігається під час експлуатації. ЗП з короткочасним зберіганням інформації використовуються для зберігання оперативної часто змінюваної інформації. У цих ЗП відключення джерел живлення, як правило, призводить до втрати інформації, що зберігається. Слід зазначити, що НПЗП при скороченні тривалості циклу запису можуть бути використані і для зберігання оперативної інформації. Зрозуміло, НПЗП можуть бути в більшості випадків використані і як ПЗП.

За адресацією ЗП можуть бути з довільною, послідовною і асоціативною вибіркою. У ЗП з довільною вибіркою (або доступом) час звернення не залежить від адреси числа в пристрої. У ЗП з послідовною вибіркою для знаходження числа за певною адресою необхідно послідовно переглянути всі комірки, що попереду заданої. Очевидно, що в цих пристроях час звернення залежить від адреси. Для пошуку певної інформаційної одиниці в такому ЗП необхідно спочатку відшукати відповідний масив, а потім інформаційну одиницю в цьому масиві.

У асоціативних ЗП (АЗП) пошук та вилучення інформації відбуваються не за місцезнаходженням (адресою), а за деякими ознаками самої інформації, що міститься в комірці. Така пам'ять, по суті, складається з адресованих комірок, проте в системі передбачений також механізм перевірки або порівняння ключової інформації з усіма записаними словами.

За характером зберігання інформації ЗП діляться на статичні і динамічні. У статичних ЗП кодуючий інформацію елемент залишається незмінним щодо носія інформації, тоді як в динамічних ЗП такий елемент переміщається періодично по відношенню до середовища носія інформації.

По кратності зчитування розрізняють ЗП із зчитуванням без руйнування інформації та ЗП із зчитуванням з руйнуванням інформації. В останньому випадку для збереження інформації необхідно відновлювати

(регенерувати) зчитану інформацію в кожному циклі звертання до ЗП, щоб мати можливість її подальшого використання.

В сучасних ЕОМ найбільш широко використовують двійкову систему числення. Тому для кодування і зберігання інформації можуть використовуватися різні фізичні процеси, що визначають два різних стани речовини, наприклад різні стани намагніченості магнітних матеріалів, наявність або відсутність заряду в даній області напівпровідника або діелектрика, кінцевий електричний опір ділянки кола і нульовий опір цієї ж ділянки, що виникає внаслідок ефекту надпровідності деяких речовин, і т.д.

За фізичними принципами роботи запам'ятовуючих елементів ЗП ділять на магнітні, напівпровідникові, оптичні і т.д.

**Магнітна пам'ять.** Фізичною основою магнітного запису сигналів є властивість феромагнітних матеріалів зберігати стан залишкової намагніченості.

Магнітний запис заснований на взаємодії магнітного носія інформації та магнітної головки при їх відносному переміщенні. Під час запису зміни в часі електричного струму перетворюються в локальні зміни намагніченості носія.

Відомі наступні різновиди пристроїв магнітної пам'яті:

- Накопичувачі на магнітному барабані.
- Накопичувачі на магнітних дисках.
- Накопичувачі на магнітній стрічці.
- Накопичувачі на магнітних картках.
- Елемент пам'яті на феритовому сердечнику.
- Інтегральні магнітні елементи пам'яті.
- Пристрої пам'яті на основі керованого руху магнітних доменів.

ЗП з магнітним записом інформації широко використовуються в якості зовнішньої пам'яті ЕОМ, що пояснюється їх великою ємністю при відносно невеликих розмірах, можливістю багаторазового застосування носія інформації при зтиранні старого запису, великим терміном зберігання записаної інформації без її спотворення, відносно високою швидкістю запису і відтворення інформації.

**Оптична пам'ять.** Останнім часом використання оптичних методів зберігання і обробки інформації розглядається як один з привабливих альтернатив звичайним запам'ятовуючим пристроям. Принципова перевага оптичної пам'яті полягає в тому, що оптика робить можливим створення ЗП великої ємності з щільно "упакованими" даними. Щільність подання інформації в оптичних ЗП, по суті, обмежена тільки дифракційною межею.

Перевагою оптичної пам'яті є також можливість паралельної обробки інформації і швидкий доступ до масивів. Все це в поєднанні з потенційно високою надійністю і прийнятними енергетичними характеристиками робить оптичну пам'ять однією з перспективних заміन напівпровідникової та магнітної пам'яті.

Принципово можливі два способи запису інформації в оптичному ЗП: побітовий та голографічний. У першому випадку будь-якій елементарній ділянці інформаційного носія відповідає один біт інформації, у другому – вся поверхня деякої ділянки носія рівномірно забезпечує зберігання масиву інформації, тобто будь-яка область, що входить в цю ділянку, зберігає з тієї чи іншої достовірністю інформацію про всі масиви відразу.

Для побітової запису інформації можна використовувати будь-яке джерело випромінювання. Однак більш кращі джерела когерентного світла – лазери, щільність потоку енергії і можливості фокусування випромінювання яких багаторазово перевершують відповідні параметри всіх інших джерел.

Голографічний запис – представлення інформації в інтерференційній формі. Тут обов'язково потрібно використання когерентного джерела випромінювання і пред'являються певні вимоги до ступеня його просторової та часової когерентності. Інформаційне навантаження при голографічному записі несе один з двох світлових пучків, на які ділиться світловий потік джерела випромінювання – його називають сигнальним або об'єктним. Просторова структура сигнального випромінювання, тобто характер розподілу енергії в площині поперечного перерізу пучка, однозначно пов'язана з ємністю масиву, що записується на носій, і розподілом в ньому інформації. Обидва пучка – інформаційний (сигнальний) і допоміжний (опорний) – інтерферують у площині носія інформації.

**Напівпровідникова пам'ять.** Основним видом машинної пам'яті за сукупністю ознак в даний час є напівпровідникова пам'ять на інтегральних схемах (ІС). Це пояснюється рядом причин: за універсальністю застосування і зручністю підключення напівпровідникові ІС не можна порівняти ні з якими іншими осередками пам'яті. Важливо й те, що напівпровідникова технологія має в своєму арсеналі достатньо засобів для перенесення на інтегральну основу будь-яких відомих схемотехнічних рішень та створення нових схем.

У конструктивному відношенні напівпровідникові ІС представляють собою напівпровідниковий кристал, в обсязі або на поверхні якого зосереджені ізолювані один від одного елементи, з'єднані згідно електричної схеми. Зазвичай кожному елементу схеми відповідає локальна область матеріалу, властивості і характеристики якої забезпечують виконання певних

функцій. Основу складає транзисторна структура, яка є базовою для реалізації всіх включених в схему активних і пасивних елементів.

Для побудови напівпровідникових ЗП використовуються ІС на біполярних транзисторах і на польових транзисторах із структурою метал-діелектрик-напівпровідник (МДН-транзистори).

В даний час чітко окреслилися два напрямки: в ІС на польових транзисторах прагнуть досягти максимальних ступенів інтеграції при помірній швидкодії і малій споживаній потужності, тоді як на біполярних транзисторах будуються надшвидкісні ІС, які можна було використовувати як елементну базу надшвидкодуючих ЕОМ.

Швидкість перемикання біполярного транзистора з одного стану в інший, а значить і швидкодія ЗП, визначається як параметрами самого приладу, так і схемою його включення. Практична швидкість спрацьовування сучасних серійних елементів на біполярних транзисторах становить  $10^{-9}$ - $10^{-8}$  с. Мінімальний час перемикання визначається часом, протягом якого носії заряду проходять через базу транзистора завдяки процесу дифузії.

Польові транзистори мають деяку перевагу перед біполярними приладами. Вони володіють високим входним опором і можуть працювати при великій напрузі на вході. Крім того, керований струм в польовому транзисторі – це струм основних носіїв заряду, який набагато краще реагує на швидкі зовнішні сигнали.

Характерною особливістю МДН-транзисторів є надзвичайно високий опір між електродами. Це дозволяє використовувати електроди транзистора як ємнісні накопичувальні елементи, потенціал яких зберігається на певному рівні протягом тривалого часу після відключення зовнішнього джерела. Практична швидкість спрацьовування МДН-комірки становить  $5 \cdot 10^{-9}$  с.

Елемент пам'яті – тригер. Транзистори і логічні схеми на їх основі самі по собі елементами пам'яті бути не можуть, так як після припинення дії входного імпульсу відразу повертаються в початковий стан.

Так як входний сигнал короткочасний, а стійкий стан тригера зберігається як завгодно довго (за умови, що не відбувається відключення живлення схеми), то тригер тим самим виконує логічну функцію запам'ятовування.

Запам'ятовуючі елементи на ТТЛ-схемах (транзисторних-транзисторна логіка на біполярних транзисторах) добре пристосовані до технології великих інтегральних схем (ВІС). Їх перевага – високий ступінь інтеграції. ТТЛ-елементи можуть бути суміщені з елементами, побудованими на транзисторних перемикачах струму.

Переважна більшість біполярних ІС пам'яті будується на приладах, функціонально більш складних, ніж традиційний транзистор.

Основу ІС пам'яті на ТТЛ-схемах складають багатомітерні транзистори. У першому наближенні багатомітерний транзистор (БЕТ) можна розглядати як сукупність окремих транзисторів з'єднаних базами і колекторами.

Запам'ятовуючі елементи на біполярних і МДН-транзисторах володіють тим суттєвим недоліком, що навіть короточасне відключення живлення призводить до руйнування записаної інформації. Це ускладнює побудову надійних напівпровідникових пристроїв пам'яті з електричним перезаписом інформації. Тому великого значення набувають бістабільні МДН-структури, що дозволяють створювати запам'ятовуючі елементи з електричним перезаписом і не втрачають інформацію при відключенні живлення.

Принцип дії бістабільних МДН-транзисторів полягає в створенні шарі діелектрика об'ємного заряду, що змінює порогову напругу. Цей заряд в діелектрику може досить довго зберігатися при відсутності на електродах транзистора напруги. Для локалізації заряду в структурі може бути використана межа розділу двох діелектриків або створений в діелектрику спеціальний плаваючий затвор. Бістабільним елементом першого типу є транзистор зі структурою метал-нітрид-оксид-напівпровідник (МНОН). В основі роботи МНОН-транзистора лежить накопичення заряду на кордоні нітридного і оксидного шарів, що є результатом неоднакових струмів провідності в тому й іншому шарах. Інший тип бістабільних МДН-транзисторів – це транзистори з одношаровим діелектриком, всередині якого на невеликій відстані від поверхні розташований не маючий зовнішнього виводу "плаваючий" затвор. Інформація зберігається у вигляді заряду на ізолюваному затворі. Для стирання інформації необхідно зарядити затвор – видалити інжекційний заряд.

Статичні запам'ятовуючі елементи зазвичай будуються на основі тригерів. Вони не вимагають регенерації інформації, можуть необмежено довго зберігати її при включеному живленні і володіють високою швидкістю. Їх недоліки – досить велике постійне споживання енергії і значна кількість приладів для побудови ЗП.

МДН-комірки зазвичай використовують в якості основи для створення динамічних систем пам'яті.

Інформація зберігається тут у вигляді заряду на конденсаторі, включеному між електродами інформаційного МДН-транзистора і загальною точкою схеми. В якості «запам'ятовуючого» конденсатора використовується



ємність затвора інформаційного транзистора і включені паралельно їй відповідні паразитні ємності.

Оскільки завжди є деякий витік заряду конденсатора, необхідно періодичне відновлення спеціальними імпульсами. Звідси й назва – динамічна пам'ять.

Існує кілька варіантів побудови динамічної пам'яті. Вони розрізняються між собою кількістю транзисторів, числом і функціональним призначенням інформаційних шин, послідовністю і характеристиками тактових імпульсів і, як наслідок, швидкодією, споживаною потужністю і площею, займаною на кристалі.

**Енергозалежна** пам'ять (англ. volatile memory, volatile storage або primary storage device) – також відома, як первинний запам'ятовуючий пристрій – це комп'ютерна пам'ять, яка потребує живлення для підтримання можливості зберігати інформацію.

Більшість видів сучасної оперативної пам'яті є енергозалежними, в тому числі DRAM і SRAM. Пам'ять адресовного змісту, як правило, реалізується з використанням енергозалежних пристроїв зберігання. До енергозалежної пам'яті відноситься оперативна пам'ять та кеш-пам'ять.

Динамічна оперативна пам'ять або DRAM (Dynamic Random Access Memory) один із видів комп'ютерної пам'яті із довільним доступом (RAM), найчастіше використовується в якості ОЗП сучасних комп'ютерів.

Основна перевага пам'яті цього типу полягає в тому, що її комірки упаковані дуже щільно, тобто в невелику мікросхему можна упакувати багато бітів, а значить, на їх основі можна побудувати пам'ять великої ємності.

В сучасних комп'ютерах фізично DRAM-пам'ять являє собою плату-модуль, на якому розміщуються мікросхеми пам'яті зі спеціалізованим з'єднувачем для підключення до материнської плати. Роль «комірок» відіграють конденсатори та транзистори, які розташовані всередині мікросхем пам'яті. Конденсатори заряджаються у випадку, коли в комірку заноситься одиничний біт, або розряджаються у випадку, якщо в комірку заноситься нульовий біт.

Пам'ять DRAM виготовляється на основі конденсаторів невеликої ємності, які швидко втрачають заряд, тому інформацію приходится оновлювати через певні проміжки часу щоб уникнути втрати даних. Цей процес називається регенерацією пам'яті. Він реалізовується спеціальним мікроконтролером, встановленим на материнській платі, або інтегрованому в кристал центрального процесора. Протягом певного часу, який називається крок регенерації, в DRAM перезаписується ціла стрічка комірок, і через кожні 8-64 мс оновлюються всі стрічки пам'яті.

Статична оперативна пам'ять з довільним доступом (SRAM, static random access memory) – напівпровідникова оперативна пам'ять, в якій кожен двійковий розряд зберігається в схемі з додатним зворотним зв'язком, що не

потребує регенерації, необхідної в динамічній пам'яті (DRAM). Але зберігати дані без перезапису SRAM можливо тільки поки є живлення, тобто SRAM залишається енергозалежним типом пам'яті. Довільний доступ (RAM – random access memory) – можливість вибирати для запису/зчитування будь-який з бітів (частіше байтів, залежить від особливостей конструкції), на відміну від пам'яті з послідовним доступом (SAM – sequential access memory).

**Енергонезалежна** пам'ять (англ. Non-volatile memory, non volatile memory, NVM або non-volatile storage) – це комп'ютерна пам'ять, яка може зберігати інформацію при відсутності живлення. Прикладами енергонезалежної пам'яті є ПЗП, флеш-пам'ять, більшість видів магнітних накопичувачів (наприклад, твердий диск, дискета або магнітна стрічка), оптичний диск, і такі давні комп'ютерні методи зберігання, як паперова стрічка і перфокарта.

Енергонезалежна пам'ять, як правило, використовується, як вторинна пам'ять або для довгострокового постійного зберігання. Найбільш широко використовувана первинна пам'ять сьогодні – це ОЗП, а це означає, що коли комп'ютер вимикається, все, що міститься в пам'яті, втрачається. На жаль, більшість форм енергонезалежної пам'яті мають обмеження, які роблять їх непридатними для використання в якості основного сховища. Як правило, енергонезалежна пам'ять або більше коштує, або має повільніший доступ.

Енергонезалежну пам'ять можна умовно розрізнити на електронно-адресовні системи постійних запам'ятовуючих пристроїв і механічно-адресовні системи, такі, як твердий диск, оптичний диск, магнітна стрічка, голографічна пам'ять тощо. Електронно-адресовні системи мають кращу швидкодію, а механічно-адресовні – дешевші.

**PROM** (англ. Programmable Read-Only Memory), програмований постійний запам'ятовувач, програмована пам'ять тільки для читання – клас напівпровідникових запам'ятовувальних пристроїв, вид постійної пам'яті з перепалюваними перемичками, який можна один раз запрограмувати перед використанням [6].

Пам'ять являє собою двовимірний масив провідників (рядків і стовпців), на перетині яких знаходиться спеціальна перемичка з металу (наприклад, ніхрому або титаново-вольфрамового сплаву) або аморфного кремнію. Програмування полягає в пропусканні через відповідну перемичку струму, який її розплавляє або випаровує. Відновлення розплавлених перемичок неможливе.

Незважаючи на уявну надійність такого рішення, ця технологія виявилась вельми примхливою. Металеві перемички при програмуванні утворювали краплі і пари металу, які осідали назад на кристал у найнесподіваніших місцях із відповідними неприємними наслідками. Полікремнієві перемички мають здатність до самовідновлення за рахунок міграції атомів. З цієї причини мікросхеми після програмування необхідно було витримувати довгий час при високій температурі з метою виявлення потенційних дефектів цього типу.

Зрештою пам'ять на перепалюваних перемичках була витіснена рішеннями на транзисторах із плаваючим затвором (EPROM, EEPROM та флеш-пам'яттю).

Недоліки PROM:

- Малий обсяг даних, який можна зберегти.
- У PROM можлива зміна даних шляхом «довипалювання» тих перемичок, які ще не були знищені. Для боротьби з такими змінами можуть застосовуватися контрольні суми.

Переваги:

- Записані дані неможливо знищити електричним способом, руйнування відбувається лише при фізичному впливі на носій.
- Висока швидкість доступу до даних – 35 нс і менше.

EPROM (англ. Erasable Programmable Read Only Memory) – клас напівпровідникових запам'ятовуючих пристроїв, постійна пам'ять, для якої допускається перезапис (перепрограмування) і для запису інформації використовується електронний пристрій-програматор.

Являє собою матрицю транзисторів з плаваючим затвором індивідуально запрограмованих за допомогою електронного пристрою, який подає більш високу напругу, ніж зазвичай використовуємо в цифрових схемах. На відміну від PROM, після програмування дані на EPROM можна стерти (сильним ультрафіолетовим світлом від ртутного джерела світла). EPROM легко визначити візуально завдяки прозорому вікну з кварцового скла у верхній частині корпусу, через яке видно кремнієвий чип і через яке проводиться опромінення ультрафіолетом під час стирання.

Кожен біт пам'яті EPROM складається з одного польового транзистора. Кожен польовий транзистор складається з каналу в напівпровідниковій підкладці пристрою. Контакти витоку і стоку підходять до зон в кінці каналу. Ізолюючий шар оксиду вирощується поверх каналу, потім наноситься провідний керуючий електрод (кремній або алюміній), а потім ще товстий шар оксиду осідає на керуючому електроді. Плаваючий затвор не має зв'язку з іншими частинами інтегральної схеми і повністю ізолюваний від оточуючих шарів оксиду. На затвор наноситься керуючий електрод, який потім покривається оксидом.

Для отримання даних з EPROM відбувається перемикання стану польового транзистора (управляється напругою на керуючому затворі). Наявність напруги на цьому затворі створює провідний канал в транзисторі, перемикаючи його в стан «увімкнено». При якомусь значенні порогової напруги на керуючому затворі транзистора можливе перміщення накопиченого заряду на плаваючому затворі, тобто програмування його стану.

Для запам'ятовування даних потрібно вибрати потрібну адресу і подати більш високу напругу на транзистори (англ. Floating Gate Avalanche Injection MOS, FAMOS). Це створює лавинний розряд електронів, які отримують достатньо енергії, щоб пройти через ізолюючий шар оксиду і осісти на

плаваючому електроді. Коли висока напруга знімається, електрони виявляються замкнутими на електроді. Через високу ізолюючу властивість оксиду кремнію навколо затвору, накопичений заряд не може витікти і дані зберігаються протягом десятиліть.

Щоб стерти дані, що зберігаються в матриці транзисторів, на неї спрямовується ультрафіолетове світло. Фотони ультрафіолетового світла створюють іонізацію в оксиді кремнію, що дозволяє заряду, схованому на плаваючому затворі, розсіятися. Так як вся матриця пам'яті піддається обробці, то всі дані стираються одночасно. Процес займає кілька хвилин для УФ-ламп невеликих розмірів.

EEPROM (англ. Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory) – постійний запам'ятовуючий пристрій, що програмується та очищується за допомогою електрики, один з видів енергонезалежної пам'яті. Пам'ять такого типу може очищуватися та заповнюватися інформацією декілька десятків тисяч разів. Використовується в твердотільних накопичувачах. Одним з різновидів EEPROM є флеш-пам'ять (англ. Flash Memory).

Принцип роботи EEPROM оснований на зміні та реєстрації електричного сигналу в ізольованій області (кишені) напівпровідникової структури.

Зміна заряду (запис та стирання) виконується поданням між затвором і витоком великого потенціалу, щоб напруженість електричного поля в тонкому діелектрику між каналом транзистора і кишенню виявилася достатньою для виникнення тунельного ефекту. Для посилення ефекту тунелювання електронів у кишеню при записі застосовується невелике прискорення електронів шляхом пропускання струму через канал польового транзистора. Зчитування виконується польовим транзистором, для якого кишеня виконує роль затвора. Потенціал плаваючого затвора змінює порогові характеристики транзистора, що і реєструється ланцюгами читання.

У 1983 році вийшли перші 16 Кбіт зразків, виготовлених на основі FLOTOX-транзисторів (Floating Gate Tunnel-OXide – плаваючий затвор з тунелюванням в оксиді). Головною відмінною особливістю EEPROM (в т.ч. Flash) є спроможність перепрограмування при підключенні до стандартної системної шини мікропроцесорного пристрою. У EEPROM з'явилася можливість виконувати стирання окремої комірки за допомогою електричного струму. Для EEPROM стирання кожної комірки виконується автоматично при записі в неї нової інформації, тобто можна змінити дані в будь-якій комірці, не зачіпаючи інші. Процедура стирання звичайно суттєво довша процедури запису.

Переваги EEPROM в порівнянні з EPROM:

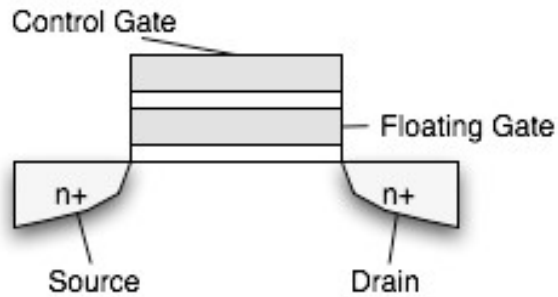
- Збільшений ресурс роботи.
- Простіша в експлуатації.

Недолік: висока вартість.

Flash-пам'ять – це тип довготривалої комп'ютерної пам'яті, вміст якої можна видалити чи перепрограмувати електрично.

При значно меншій ціні та значно більших об'ємах флеш-пам'яті у порівнянні з EEPROM, вона стала домінуючою технологією у випадку, коли необхідно довготривале, стійке збереження інформації. Приклади її застосування найрізноманітніші: від цифрових аудіоплеєрів, камер до мобільних телефонів і КПК.

У флеш-пам'яті використовується дещо відмінний від EEPROM тип комірки-транзистора (рис. 1). Технологічно флеш-пам'ять споріднена як з EPROM, так і з EEPROM.



*Рис. 1 Переріз транзистора з плаваючим затвором*

Основна відмінність флеш-пам'яті від EEPROM полягає у тому, що стирання вмісту комірок виконується або для всієї мікросхеми, або для певного блоку (кластера, кадру або сторінки). Звичний розмір такого блоку складає 256 або 512 Байт, проте в деяких видах флеш-пам'яті об'єм блоку може досягати 256 КБ. Слід помітити, що існують мікросхеми, що дозволяють працювати з блоками різних розмірів (для оптимізації швидкодії).

Таким чином, в загальному випадку, для того, щоб змінити один байт, спочатку в буфер прочитується весь блок, де міститься належний зміні байт, стирається вміст блоку, змінюється значення байта в буфері, після чого проводиться запис зміненого в буфері блоку назад на своє місце. Така схема суттєво знижує швидкість запису невеликих об'ємів даних в довільні області пам'яті, проте значно збільшує швидкодію при послідовному записі даних великими порціями.

Переваги флеш-пам'яті в порівнянні з EEPROM:

- Вища швидкість запису при послідовному доступі за рахунок того, що стирання інформації у флеш проводиться блоками.
- Собівартість виробництва флеш-пам'яті нижча за рахунок простішої організації.

Недолік: повільний запис в довільні ділянки пам'яті.

Існують 2 основні архітектури флеш-пам'яті: NOR і NAND. Пристрої на їх основі розрізняються методом з'єднання осередків в масив і алгоритмами читання-запису.

NOR-Flash використовує класичну двовимірну матрицю провідників («рядка» і «стовпця») в якій на перетині встановлено по одній клітинці. При цьому провідник рядків підключався до стоку транзистора, а стовпців – до другого затвору. Вихід підключався до загальної для всіх підкладки. У такій

конструкції було легко рахувати стан конкретного транзистора, подавши позитивну напругу на один стовпець і один рядок (рис. 2).

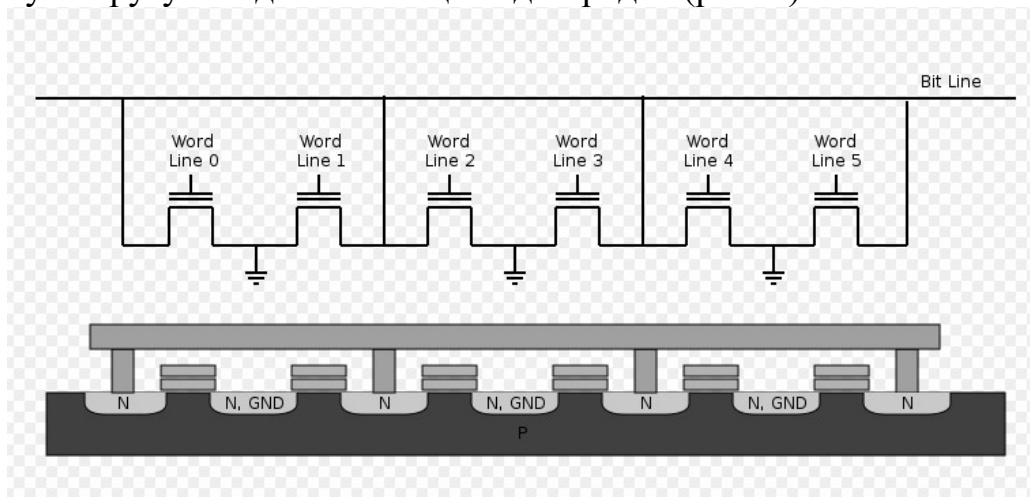


Рис. 2 . Компонівка шести комірок NOR-Flash

NAND-Flash – це вже тривимірний масив. В основі та ж сама матриця що і в NOR, але замість одного транзистора в кожному перетині встановлюється стовпець з послідовно включених комірок. У такій конструкції затворів ланцюгів в одному перетині виходить багато. Щільність компонування можна різко збільшити (адже до одного осередку в стовпці підходить тільки один провідник затвора), проте алгоритм доступу до осередків для читання і запису помітно ускладнюється (рис. 1.3).

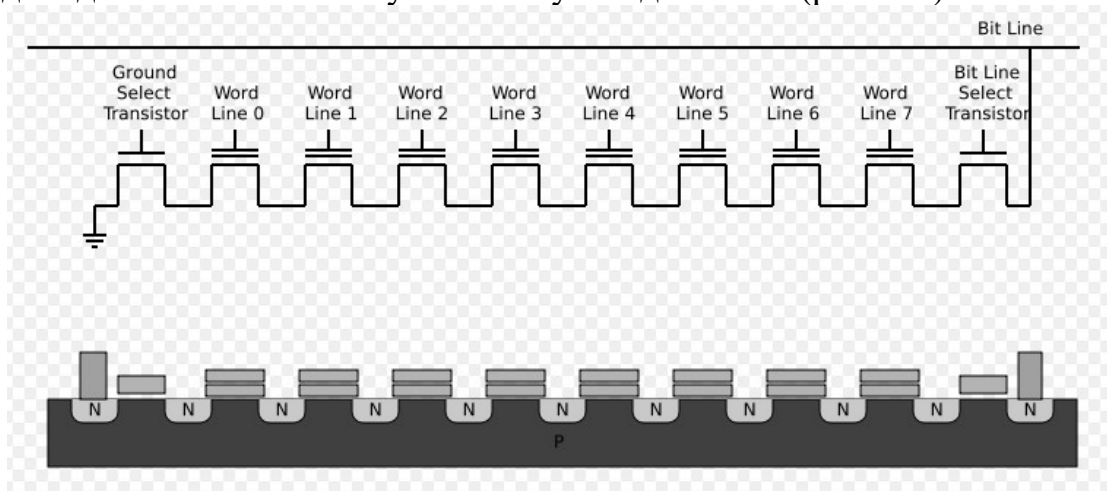


Рис. 3. Структура одного стовця NAND-Flash

Технологія NOR дозволяє отримати швидкий доступ індивідуально до кожної клітинки, проте площа осередку велика. Навпаки, NAND мають малу площу комірки але відносно тривалий доступ відразу до великої групи осередків. Існує два основних застосування флеш-пам'яті: як мобільний носій інформації і як сховище програмного забезпечення («прошивки»). Найчастіше ці два застосування поєднуються в одному пристрої. Флеш-пам'ять дозволяє оновлювати прошивку пристроїв в процесі експлуатації.

Найбільші значення обсягів мікросхем NOR – 64 МБайт. NAND має найбільші значення обсягу на мікросхему до десятків Гбайт.

Слабке місце флеш-пам'яті – кількість циклів перезапису в одній сторінці. Ситуація погіршується також у зв'язку з тим, що стандартні файлові системи часто записують дані, не чергуючи області. Часто оновлюється коренева таблиця файлової системи, так що перші сектори пам'яті витратять свій запас значно раніше. Розподіл навантаження дозволить істотно продовжити термін роботи пам'яті.

## 2. Порядок виконання лабораторної роботи

### 2.1. Схема лабораторного стенду

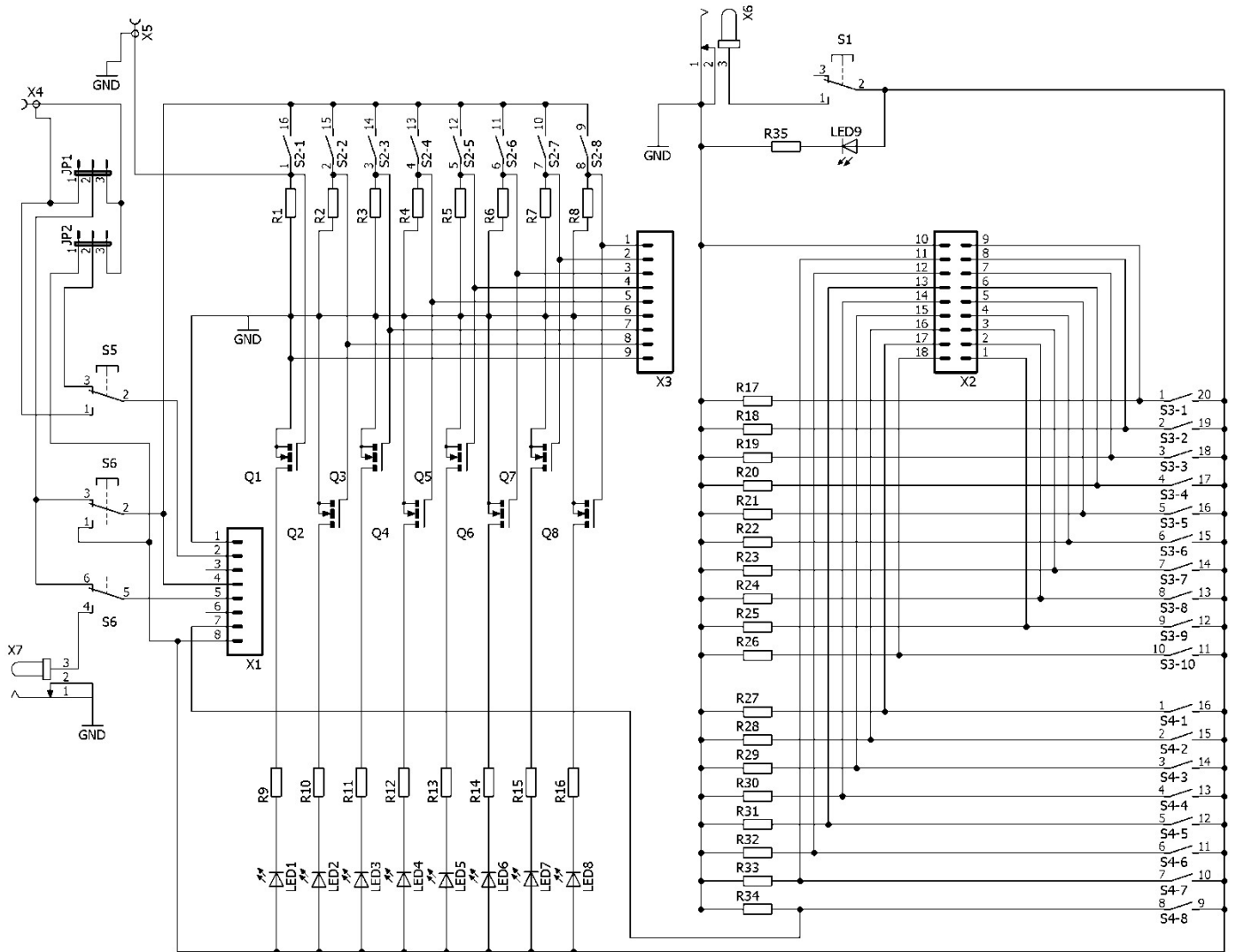


Рис. 4. Схема електрична принципова основного модуля стенда.

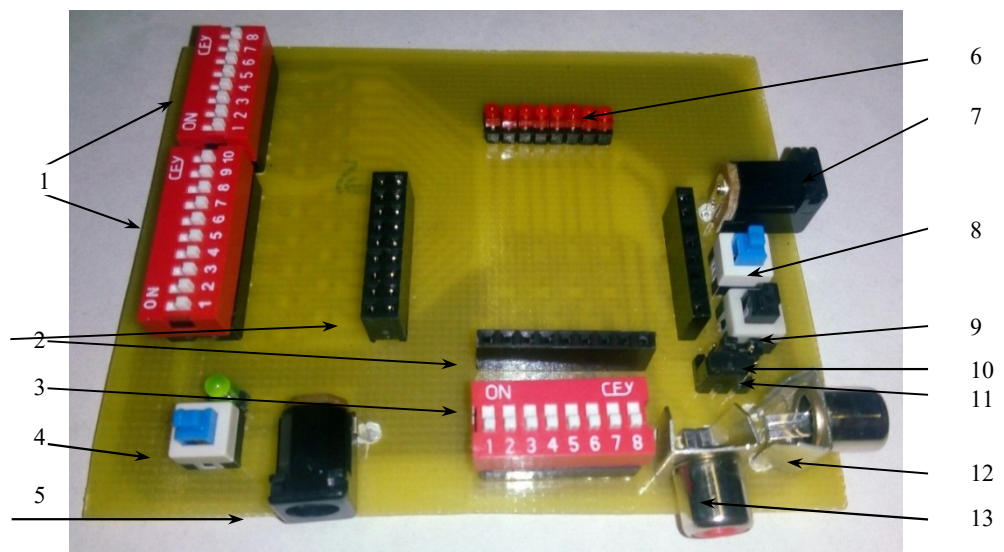
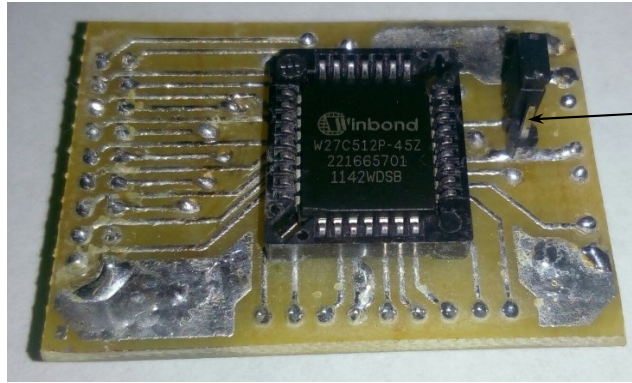
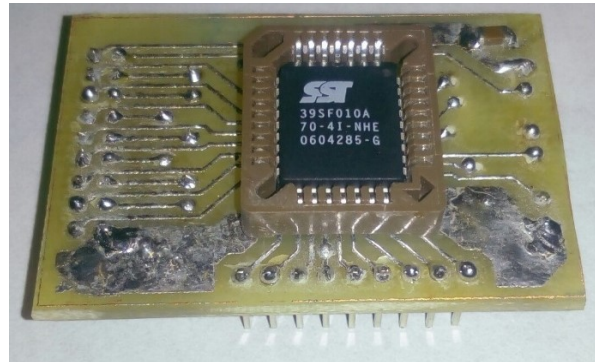


Рис. 5 – Зовнішній вигляд макета.





*Рис. 6 – Змінний модуль EEPROM-пам'яті.*



*Рис. 7 – Змінний модуль Flash-пам'яті.*

1. З 1 по 17 – адресні перемикачі, 18-й – перемикач дозволу запису (WE) для Flash-пам'яті. На фотографії у вимкненому положенні.
  2. Панелі підключення змінних модулів пам'яті.
  3. Панель перемикачів байту даних. На фотографії у вимкненому положенні.
  4. Кнопка живлення з індикатором живлення.
  5. Роз'єм живлення (5 В).
  6. Панель індикаторів байту даних.
  7. Роз'єм додаткового живлення (12-14 В).
  8. Кнопка дозволу зчитування (OE). В натисненому стані на вхід OE подається  $V^0$ .
  9. Кнопка дозволу доступу до мікросхеми (CE). В натисненому стані на вхід CE подається  $V^0$ .
  10. Перемикач для підключення генератора до входу дозволу доступу до мікросхеми (CE). На фотографії у відключеному положенні.
  11. Перемикач для підключення генератора до входу дозволу зчитування (OE). На фотографії у підключеному положенні.
  12. Гніздо для підключення генератора.
  13. Гніздо для підключення осцилографа.
  14. Перемикач для підключення шини 12-14 В до контакту  $A_9$  мікросхеми EEPROM-пам'яті. На фотографії у відключеному положенні.
- Для кращого розуміння роботи мікросхем рекомендується ознайомитись з їхніми технічними даними за посиланнями [8] та [9].

## **2.2. Порядок виконання роботи**

1. Зібрати стенд. При вимкненому живленні підключити джерела 5 В та 14 В, генератор та осцилограф до відповідних роз'ємів основного модуля.
2. Встановити змінний модуль EEPROM-пам'яті. Ввімкнути живлення.
3. Відповідно до додатку 2 провести процедуру повного стирання інформації з мікросхеми.
4. Відповідно до додатку 2 провести процедуру запису байту інформації у задану викладачем комірку пам'яті мікросхеми. В якості байту даних береться довільне число в діапазоні від 0 до 255 у двійковій системі.
5. Відповідно до додатку 2 провести процедуру зчитування інформації з попередньо записаної комірки пам'яті мікросхеми. Необхідно врахувати, що для коректного зчитування даних перемикачі на панелі 3 повинні бути виключені.
6. Переключити перемикач 11 у положення роботи від генератора. Перевести всі перемикачі і кнопки у положення що відповідають алгоритму зчитування EEPROM-пам'яті (див. додаток 2). Зняти осцилограми зчитування біту даних.
7. Переключити перемикач 11 у положення роботи від кнопки. Вимкнути живлення основного модуля стенда. Відключити блок живлення 12 В. Встановити змінний модуль Flash-пам'яті. Ввімкнути живлення.
8. Відповідно до додатку 3 провести процедуру повного стирання інформації з мікросхеми.
9. Відповідно до додатку 3 провести процедуру запису байту інформації у задану викладачем комірку пам'яті мікросхеми. В якості байту даних береться довільне число в діапазоні від 0 до 255 у двійковій системі.
10. Відповідно до додатку 3 провести процедуру зчитування інформації з попередньо записаної комірки пам'яті мікросхеми. Необхідно врахувати, що для коректного зчитування даних перемикачі на панелі 3 повинні бути виключені.
11. Переключити перемикач 11 у положення роботи від генератора. Перевести всі перемикачі і кнопки у положення що відповідають алгоритму зчитування Flash-пам'яті (див. додаток 3). Зняти осцилограми зчитування біту даних.
12. Переключити перемикач 11 у положення роботи від кнопки. Вимкнути живлення основного модуля стенда.

### **2.3. Обробка результатів**

1. Побудувати блок-схеми алгоритмів запису/зчитування/стирання досліджуваних мікросхем пам'яті. Провести їх порівняльний аналіз.
2. Привести осцилограми (відтворені або фотографії) при зчитуванні даних з обох мікросхем.
3. Проаналізувати отримані значення часових характеристик зчитування розглянутих мікросхем та порівняти їх з даними виробника
4. Написати висновки по роботі.

---

#### **Вимоги до звіту:**

Звіт оформлюється на листах А4 у друкованій або рукописній формі і повинен містити:

- титульний аркуш;
- мету роботи;
- порядок виконання роботи;
- експериментальні результати у табличному та графічному вигляді;
- обробку результатів;
- висновки (включаючи аналіз експериментальних даних та даних отриманих в результаті їх обробки).

### **Контрольні запитання**

1. Класифікація запам'ятовуючих пристроїв за принципом збереження інформації.
2. Класифікація запам'ятовуючих пристроїв за терміном зберігання інформації.
3. Принципи реалізації напівпровідникової пам'яті.
4. Класифікація енергозалежної пам'яті.
5. Класифікація енергонезалежної пам'яті.
6. Конструктивні особливості DRAM-пам'яті.
7. Конструктивні особливості SRAM-пам'яті.
8. Конструктивні особливості PROM-пам'яті.
9. Конструктивні особливості EPROM-пам'яті.
10. Конструктивні особливості EEPROM-пам'яті.
11. Конструктивні особливості Flash-пам'яті.
12. Відмінності між EEPROM- та Flash-пам'яттю.
13. Відмінність між послідовним та паралельним інтерфейсом доступу до пам'яті.
14. Принцип реалізації NAND архітектури. Її переваги та недоліки.
15. Принцип реалізації NOR архітектури. Її переваги та недоліки.

### Список літератури

1. Васюра А. С. Електромагнітні елементи цифрової техніки. - Вінниця, 2001. - 162 с.
2. Технічна енциклопедія. Том 1 : Магнітний носій - інформація [Електронний ресурс] // Енциклопедія TechTrend – технічні терміни. – Режим доступу до ресурсу: <http://techtrend.com.ua/index.php?newsid=11839>.
3. Оптические диски. История, состояние, перспективы развития / Петров В.В., Крючин А.А., Шанойло С.М. и др. — К.: Наук. думка, 2004. — 174 с.
4. Э. Таненбаум Архитектура компьютера. – СПб.: Питер, 2007. — 844 с.
5. Скотт Мюллер Модернизация и ремонт ПК : Глава 6. Оперативная память : 17-е изд. — М.: Вильямс, 2007. – 1489 с.
6. Угрюмов Е. П. Цифровая схемотехника : Глава 5. Запоминающие устройства : 3 изд. – БХВ-Петербург, 2010. – 124 с.
7. Dr George Ettinger Progress of the PROM — the micro's mate // New Scientist, 5 july 1979. – Pp. 34-36.
8. W27C512: Datasheet [Електронний ресурс] // Winbond. – Режим доступу до ресурсу: <http://www.rcscomponents.kiev.ua/datasheets/W27C512-45Z.pdf>
9. SST39SF010A: Datasheet [Електронний ресурс] // A Microchip Technology Company. – Режим доступу до ресурсу. – [http://download.siliconexpert.com/pdfs/2013/5/13/5/2/12/128/mcp\\_/manual/29325022b.pdf](http://download.siliconexpert.com/pdfs/2013/5/13/5/2/12/128/mcp_/manual/29325022b.pdf)

*Додаток 1. Титульний аркуш протоколу*  
**Національний технічний університет України**  
**«Київський Політехнічний Інститут імені Ігоря Сікорського»**  
Факультет електроніки  
Кафедра мікроелектроніки

*Курс: «Функціональна електроніка»*

Лабораторна робота №\_  
« \_\_\_\_\_ »  
назва роботи

Виконали:  
ст. IV курсу ФЕЛ, гр. \_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

Викладач:  
\_\_\_\_\_

Київ 201\_

## Додаток 2. Алгоритми EEPROM

Усі напруги на кожному з виводів, необхідні для реалізації алгоритмів запису, зчитування та стирання, подано для зручності у вигляді таблиці.

### Необхідні напруги на виводах мікросхеми для проведення операцій над даними (EEPROM)

| ЗАП                              |                                 | ЗЧИТУВАННЯ                       |                                 | СТИРАННЯ                        |  |
|----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|--|
| Вивід                            | Значенн                         | Вивід                            | Значенн                         | Вивід                           | Значенн                                  |
| OE/V <sub>PP</sub>               | 12 В                            | OE/V <sub>PP</sub>               | V <sup>0</sup>                  | OE/V <sub>PP</sub>              | 14 В                                     |
| V <sub>CC</sub>                  | 5 В                             | V <sub>CC</sub>                  | 5 В                             | V <sub>CC</sub>                 | 5 В                                      |
| A <sub>0</sub> – A <sub>15</sub> | V <sup>0</sup> / V <sup>1</sup> | A <sub>0</sub> – A <sub>15</sub> | V <sup>0</sup> / V <sup>1</sup> | A <sub>0</sub> – A <sub>8</sub> | 14 В<br>V <sup>0</sup><br>V <sup>0</sup> |
| Q <sub>0</sub> – Q <sub>7</sub>  | V <sup>0</sup> / V <sup>1</sup> | Q <sub>0</sub> – Q <sub>7</sub>  | D <sub>OUT</sub>                | Q <sub>0</sub> – Q <sub>7</sub> | V <sup>1</sup>                           |
| CE                               | V <sup>0</sup>                  | CE                               | V <sup>0</sup>                  | CE                              | V <sup>0</sup>                           |

#### Запис

Для EEPROM процедура запису – це єдиний спосіб змінити значення у комірці з «1» на «0». Запис викликається подачею напруги 12 В на вивід OE/V<sub>PP</sub> та напруги живлення 5 В на вивід V<sub>CC</sub>. Потім необхідно виставити необхідну адресу за допомогою адресних перемикачів № 1-16 та виставити необхідний байт перемикачами вводу/виводу даних № 1-8. Запис запускається подачею «0» на вивід CE.

#### Зчитування

Для зчитування даних виставляємо бажану адресу на відповідних перемикачах, подаємо «0» на вивід CE для управління живленням і доступом до чіпу, і на вивід OE/V<sub>PP</sub>, який керує вихідним буфером передачі даних для зчитування, також подаємо «0». При живленні 5 В через вивід V<sub>CC</sub> відбувається зчитування байту та поява напруги «0» чи «1» на відповідних виводах даних.

#### Стирання

Це єдина можливість змінити значення у комірці з «0» на «1». Операція стирання викликається підключенням напруги 14 В до виводу OE та адресного виводу A<sub>9</sub>, усі інші виводи повинні бути підключені до «0», а на усіх виводах даних виставлено «1». Стирання запускається подачею значення напруги «0» на вивід CE.

### Додаток 3. Алгоритми Flash

Алгоритми запису, зчитування та стирання для Flash-пам'яті реалізуються за допомогою певних послідовностей команд, кожна з яких має свою адресу для запису. Цей механізм носить назву «Захист програмних даних», – стандарт, забезпечений JEDEC.

#### Необхідні напруги на виводах мікросхеми для проведення операцій над даними (Flash)

| ЗАПИС                            |                              | ЗЧИТУВАННЯ                       |                  | СТИРАННЯ                         |                       |
|----------------------------------|------------------------------|----------------------------------|------------------|----------------------------------|-----------------------|
| Вивід                            | Значення                     | Вивід                            | Значення         | Вивід                            | Значення              |
| A <sub>0</sub> -A <sub>16</sub>  | A <sub>IN</sub><br>(command) | A <sub>0</sub> -A <sub>16</sub>  | A <sub>IN</sub>  | A <sub>0</sub> -A <sub>16</sub>  | (command<br>sequence) |
| DQ <sub>0</sub> -DQ <sub>7</sub> | D <sub>IN</sub><br>(command) | DQ <sub>0</sub> -DQ <sub>7</sub> | D <sub>OUT</sub> | DQ <sub>0</sub> -DQ <sub>7</sub> | (command<br>sequence) |
| V <sub>DD</sub>                  | 5 В                          | V <sub>DD</sub>                  | 5 В              | V <sub>DD</sub>                  | 5 В                   |
| CE                               | V <sup>0</sup>               | CE                               | V <sup>0</sup>   | CE                               | V <sup>0</sup>        |
| OE                               | V <sup>1</sup>               | OE                               | V <sup>0</sup>   | OE                               | V <sup>1</sup>        |
| WE                               | V <sup>0</sup>               | WE                               | V <sup>1</sup>   | WE                               | V <sup>0</sup>        |

#### Запис байту

Перед тим, як записати у сектор байт, цей сектор необхідно повністю стерти. Операція запису проводиться у три етапи: перший – послідовність завантаження трьох байт для «Захисту програмних даних» (команди та їх адреса приведені біт за бітом у відповідній таблиці); другий – введення користувацьких байтів адреси та даних; третій – внутрішня операція запису, тривалістю до 20 мкс. Будь-які інші команди в цей час ігноруються.



### Послідовності команд для проведення запису (Flash)

| 1 блок              |                     | 2 блок              |                     | 3 блок              |                     | 4 блок                    |                        |
|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------------|------------------------|
| A <sub>0</sub> = 1  | DQ <sub>0</sub> = 0 | A <sub>0</sub> = 0  | DQ <sub>0</sub> = 1 | A <sub>0</sub> = 1  | DQ <sub>0</sub> = 0 | A <sub>0</sub> = Address  | DQ <sub>0</sub> = Data |
| A <sub>1</sub> = 0  | DQ <sub>1</sub> = 1 | A <sub>1</sub> = 1  | DQ <sub>1</sub> = 0 | A <sub>1</sub> = 0  | DQ <sub>1</sub> = 0 | A <sub>1</sub> = Address  | DQ <sub>1</sub> = Data |
| A <sub>2</sub> = 1  | DQ <sub>2</sub> = 0 | A <sub>2</sub> = 0  | DQ <sub>2</sub> = 1 | A <sub>2</sub> = 1  | DQ <sub>2</sub> = 0 | A <sub>2</sub> = Address  | DQ <sub>2</sub> = Data |
| A <sub>3</sub> = 0  | DQ <sub>3</sub> = 1 | A <sub>3</sub> = 1  | DQ <sub>3</sub> = 0 | A <sub>3</sub> = 0  | DQ <sub>3</sub> = 0 | A <sub>3</sub> = Address  | DQ <sub>3</sub> = Data |
| A <sub>4</sub> = 1  | DQ <sub>4</sub> = 0 | A <sub>4</sub> = 0  | DQ <sub>4</sub> = 1 | A <sub>4</sub> = 1  | DQ <sub>4</sub> = 0 | A <sub>4</sub> = Address  | DQ <sub>4</sub> = Data |
| A <sub>5</sub> = 0  | DQ <sub>5</sub> = 1 | A <sub>5</sub> = 1  | DQ <sub>5</sub> = 0 | A <sub>5</sub> = 0  | DQ <sub>5</sub> = 1 | A <sub>5</sub> = Address  | DQ <sub>5</sub> = Data |
| A <sub>6</sub> = 1  | DQ <sub>6</sub> = 0 | A <sub>6</sub> = 0  | DQ <sub>6</sub> = 1 | A <sub>6</sub> = 1  | DQ <sub>6</sub> = 0 | A <sub>6</sub> = Address  | DQ <sub>6</sub> = Data |
| A <sub>7</sub> = 0  | DQ <sub>7</sub> = 1 | A <sub>7</sub> = 1  | DQ <sub>7</sub> = 0 | A <sub>7</sub> = 0  | DQ <sub>7</sub> = 1 | A <sub>7</sub> = Address  | DQ <sub>7</sub> = Data |
| A <sub>8</sub> = 1  |                     | A <sub>8</sub> = 0  |                     | A <sub>8</sub> = 1  |                     | A <sub>8</sub> = Address  |                        |
| A <sub>9</sub> = 0  |                     | A <sub>9</sub> = 1  |                     | A <sub>9</sub> = 0  |                     | A <sub>9</sub> = Address  |                        |
| A <sub>10</sub> = 1 |                     | A <sub>10</sub> = 0 |                     | A <sub>10</sub> = 1 |                     | A <sub>10</sub> = Address |                        |
| A <sub>11</sub> = 0 |                     | A <sub>11</sub> = 1 |                     | A <sub>11</sub> = 0 |                     | A <sub>11</sub> = Address |                        |
| A <sub>12</sub> = 1 |                     | A <sub>12</sub> = 0 |                     | A <sub>12</sub> = 1 |                     | A <sub>12</sub> = Address |                        |
| A <sub>13</sub> = 0 |                     | A <sub>13</sub> = 1 |                     | A <sub>13</sub> = 0 |                     | A <sub>13</sub> = Address |                        |
| A <sub>14</sub> = 1 |                     | A <sub>14</sub> = 0 |                     | A <sub>14</sub> = 1 |                     | A <sub>14</sub> = Address |                        |
| A <sub>15</sub>     |                     | A <sub>15</sub>     |                     | A <sub>15</sub>     |                     | A <sub>15</sub> = Address |                        |
| A <sub>16</sub>     |                     | A <sub>16</sub>     |                     | A <sub>16</sub>     |                     | A <sub>16</sub> = Address |                        |

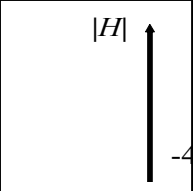
де **Address** – адреса пам'яті; **Data** – записувані дані.

### Зчитування

Управління зчитуванням здійснюється завдяки виводам CE і OE, причому на обидва необхідно подавати напругу «0», а от на вивід контролю над записом WE потрібно подавати значення «1».

У даному випадку вивід CE використовується для звернення до пам'яті мікросхеми, а OE служить для керування операціями виводу та для пропускання даних на вихід.

### Стирання (секторне або повне)



Для проведення будь-якої операції стирання необхідно виконати послідовність завантаження **6** байтів команди для «Захисту програмних даних», де в останньому блоці буде міститися команда (**30<sub>H</sub>**) і адреса сектору (**SA**, адресні виводи № 12-16) для очистки сектору (або ж до останнього блоку входить команда (**10<sub>H</sub>**) і адреса (**5555<sub>H</sub>**) для стирання усієї пам'яті).

Окрім того, на виводи CE і WE подається значення напруги «0», але на OE має бути значення «1».

Далі знаходиться таблиця переведу значень із шіснадцяткової системи числення у двійкову, а також таблиці, у яких представлені адреси та послідовності завантаження команд, переведені у двійкову систему числення, з поділом на окремі біти, які розподілені між необхідними виводами.

**Таблиця переведення значення з HEX у BIN**

|                   |                        |
|-------------------|------------------------|
| 0000 <sub>2</sub> | <b>0</b> <sub>16</sub> |
| 0001 <sub>2</sub> | <b>1</b> <sub>16</sub> |
| 0010 <sub>2</sub> | <b>2</b> <sub>16</sub> |
| 0011 <sub>2</sub> | <b>3</b> <sub>16</sub> |

|                   |                        |
|-------------------|------------------------|
| 0100 <sub>2</sub> | <b>4</b> <sub>16</sub> |
| 0101 <sub>2</sub> | <b>5</b> <sub>16</sub> |
| 0110 <sub>2</sub> | <b>6</b> <sub>16</sub> |
| 0111 <sub>2</sub> | <b>7</b> <sub>16</sub> |

|                   |                        |
|-------------------|------------------------|
| 1000 <sub>2</sub> | <b>8</b> <sub>16</sub> |
| 1001 <sub>2</sub> | <b>9</b> <sub>16</sub> |
| 1010 <sub>2</sub> | <b>A</b> <sub>16</sub> |
| 1011 <sub>2</sub> | <b>B</b> <sub>16</sub> |

|                   |                        |
|-------------------|------------------------|
| 1100 <sub>2</sub> | <b>C</b> <sub>16</sub> |
| 1101 <sub>2</sub> | <b>D</b> <sub>16</sub> |
| 1110 <sub>2</sub> | <b>E</b> <sub>16</sub> |
| 1111 <sub>2</sub> | <b>F</b> <sub>16</sub> |